

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

STÉPHANIE ABISAG SÁEZ MEYER

**APROVEITAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA E LODO FÍSICO-
QUÍMICO PROVENIENTES DA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MDF**

CURITIBA

2012

STÉPHANIE ABISAG SÁEZ MEYER

**APROVEITAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA E LODO FÍSICO-
QUÍMICO PROVENIENTES DA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MDF**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Urivald Pawlowsky

Coorientador: Prof. Dr. Vsévolod Mymrine

CURITIBA

2012

M612a

Meyer, Stéphanie Abisag Sáez

Aproveitamento de água residuária tratada e lodo físico-químico provenientes da produção de painéis de MDF [manuscrito] / , Stéphanie Abisag Sáez Meyer. – Curitiba, 2011.

156f. . : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Impresso.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2012.

Orientador: Urivald Pawlowsky-- Co-orientador: Vsévolod Mymrine

1. Águas residuais - Purificação. 2. Resíduos industriais – Purificação. I. Universidade Federal do Paraná. II. Pawlowsky, Urivald. III. Mymrine, Vsévolod. IV. Título.

CDD: 628.3


TERMO DE APROVAÇÃO

Stéphanie Abisag Sáez Meyer

**“APROVEITAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA E LODO FÍSICO-QUÍMICO
PROVENIENTES DA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MDF”**

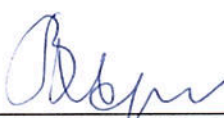
Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

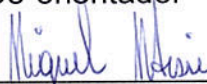


Urivald Pawlowsky
Universidade Federal do Paraná
Orientador

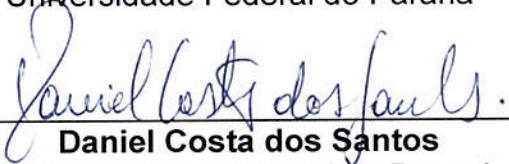
MEMBROS:



Vsévolod Mymrine
Universidade Federal do Paraná
Co-orientador



Miguel Mansur Aisse
Universidade Federal do Paraná



Daniel Costa dos Santos
Universidade Federal do Paraná



Ana Lucia Ramalho Mercê
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 09 de março de 2012

DEDICATÓRIA

**Aos meus pais e irmãos,
companheiros de
todos os momentos.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu guia e protetor, que esteve sempre ao meu lado durante todo este tempo me auxiliando e me fortalecendo para vencer cada etapa.

Ao meu orientador professor Dr. Urivald Pawlowsky, por todo ensinamento transmitido, orientação constante e de grande valia, amizade e incentivo em todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador professor Dr. Vsévolod Mymrine pela amizade, disponibilidade e apoio irrestritos.

Aos meus pais, Marcela e Jorge, e minha irmã, Carolina, pelo amor e compreensão.

Ao Rodrigo Secchi, Evelin e Francieli do Laboratório de análise de mineirais e rochas (LAMIR). Ao Rodrigo Mets do Laboratório de Materiais (LaMats) do Departamento de mecânica da UFPR pelo auxílio no equipamento de compressão. A Alda do Laboratório de Microscopia eletrônica da Bosch e ao Centro de Microscopia Eletrônica- CME da UFPR.

Ao Florisvaldo no auxílio das análises com o flotatest e aos representantes das empresas: Luiz Lamb (TANAC), Fernando Fabelino (KURITA), Amadeu (GeBetz) e Ricardo (Buckman) pelo fornecimento de materiais como coagulantes, floculantes e polímeros; bem como informações técnicas. Ao Walderson Klitzke pelo auxílio na secagem a vácuo do material.

À empresa Berneck painéis e serrados pelo apoio financeiro prestado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, e à Berneck S.A - Painéis e Serrados pelo suporte financeiro.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, pelos recursos e instalações essenciais para a realização deste estudo.

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo”.

Nelson Rolihlahla Mandela

RESUMO

No meio industrial a necessidade de minimizar a geração de resíduos e buscar reaproveitá-los vem aumentando, devido a efetivação da cobrança pela captação da água e descarte de efluentes, adequada disposição e aumento das exigências da legislação ambiental. Este estudo avaliou uma tecnologia de pós-tratamento de água residuária, a fim de adequá-la aos padrões de reúso, bem como realizou uma proposta de aproveitamento do lodo oriundo do tratamento físico-químico, provenientes do processo produtivo de uma fábrica de painéis de MDF. Com o objetivo de reduzir o consumo de água e também do descarte do efluente foi proposta uma avaliação técnica do pós-tratamento por coagulação e floculação que pudessem proporcionar a utilização do efluente dentro da unidade fabril. Foram utilizados cinco tipos de coagulantes e três diferentes auxiliares de coagulação para promover a remoção de cor, turbidez e DQO. Em paralelo foram ainda realizadas pesquisas voltadas ao aproveitamento dos resíduos de cinzas, lodo físico-químico e cal para a fabricação de um novo produto com características adequadas para seu uso na construção civil. Assim, foram produzidos, através de distintas combinações dos resíduos, corpos de prova, os quais tiveram suas características mecânicas, químicas e mineralógicas testadas visando obter um material com as melhores características e resistência. Os resultados obtidos permitem concluir que para o pós-tratamento da água residuária por coagulação/floculação todos os parâmetros analisados atenderam a possibilidade de reúso com exceção da DQO no tratamento seguido de flotação (~38 mg/l) que em torres de resfriamento deve ser 30 mg/l. Porém esse valor foi obtido quando o tratamento foi seguido de sedimentação (~26 mg/l). Já para os resíduos, teores de cerca de 30 – 45 % em massa de ambos resultaram em níveis de resistência mecânica apropriados para a finalidade de aplicação destes produtos na construção civil, além de serem economicamente atrativos devido ao baixo custo das matérias-primas (resíduos industriais) e aos grandes benefícios ambientais, por evitar a incorreta disposição dos mesmos.

Palavras-chave: resíduos industriais, minimização e reaproveitamento, indústria de painéis de MDF, materiais para construção civil, reúso de água residuária.

ABSTRACT

In the industrial environment, the need to reduce waste production and recycle residues is increasing rapidly, due to the costs for water use and the disposal of effluent, besides adequate environmental legislation. This study evaluated an after-treatment wastewater technology in order to have it conformed to its reuse standard patterns, and also proposed the use of sludge derived from the physic-chemical treatment which is part of the process of MDF factory board production. In order to reduce water consumption and also the disposal of its effluents, the study proposes a technical evaluation of post-treatment through coagulation and flocculation that could provide the reuse of wastewater within the plant. Five types of coagulants were used combined to other three different coagulation aids to promote the removal of color, COD and turbidity. Parallel studies were also carried out aimed at the recovery of waste ash, physic-chemical sludge and lime for the manufacture of a new product with better characteristics for its use in civil construction. Thus, sample analysis were produced through different combinations of waste specimens, which had their mechanical, chemical and mineralogical characteristics tested so as to obtain a material with better characteristics and resistance as well. Results indicate that for the post-treatment of wastewater by coagulation/flocculation, all the parameters that were analyzed allowed the possibility of reuse, except COD in the treatment followed by flotation (~38 mg/l) that should be of 30 mg/l in cooling towers. However, this value was obtained when the treatment was followed by sedimentation (~26 mg/l). As for the waste, contents of about 30-45% by weight resulted in appropriate levels of mechanical resistance. Such levels are suitable considering the application of these products in civil construction; besides that, they are economically attractive because of the low cost of raw materials (industrial waste) and major environmental benefits avoiding inadequate waste disposal.

Key-words: industrial waste, minimization and recycling, MDF industry, construction materials, reuse of wastewater.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – HIERARQUIA DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS APROVADA PELA UNIÃO EUROPÉIA	23
FIGURA 2.2 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAINÉIS DE MDF	51
FIGURA 3.1 – PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF ..	67
FIGURA 3.2 - ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF	68
FIGURA 3.3 - ETAPAS DO PROCESSO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF.....	70
FIGURA 3.4 – UNIDADE EXPERIMENTAL TIPO JAR TEST UTILIZADO NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE SEDIMENTAÇÃO	74
FIGURA 3.5 – UNIDADE EXPERIMENTAL TIPO JAR TEST UTILIZADO NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE FLOTAÇÃO	75
FIGURA 3.6 – MOLDE DE AÇO PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	84
FIGURA 3.7 – PRENSA MANUAL UTILIZADA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	85
FIGURA 3.8 – PRENSA EMIC UTILIZADA PARA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	87
FIGURA 4.1 – DIFRATOGRAMA DA CINZA	104
FIGURA 4.2 - MICROGRAFIAS DA CINZA (A) 100X, (B) E (C) 1000X E (D) 5000X	105
FIGURA 4.3 – MICROGRAFIA DA CINZA 5000X.....	106
FIGURA 4.4 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DA CINZA.....	107
FIGURA 4.5 - DIFRATOGRAMA DO LODO	109
FIGURA 4.6 – MICROGRAFIAS DO LODO (A) 100X, (B) E (C) 1000X E (D) 5000X	110
FIGURA 4.7 - MICROGRAFIA DO LODO 5000X.....	111
FIGURA 4.8 - MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DO LODO.....	111
FIGURA 4.9 – MICROGRAFIAS DA CAL RESIDUAL (A) 50X, (B) 200X, (C) 950X E (D) 3000X.....	113
FIGURA 4.10 - CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS	114

FIGURA 4.11 - CORPO DE PROVA (A) DURANTE E (B) NO FINAL DE SUA COMPRESSÃO.....	115
FIGURA 4.12 – RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA EM DIFERENTES IDADES DE CURA.....	117
FIGURA 4.13 – DIFRATOGRAMA DA MISTURA SECA DA COMPOSIÇÃO 5.....	122
FIGURA 4.14 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 3 DIAS DE CURA.	124
FIGURA 4.15 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 14 DIAS DE CURA	125
FIGURA 4.16 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 60 DIAS DE CURA	127
FIGURA 4.17 –DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 180 DIAS DE CURA	129
FIGURA 4.18 – MICROGRAFIAS PARA O CORPO DE PROVA DA AMOSTRA 5 NA IDADE DE 3 DIAS (A) 100X, (B), (C) (D) 1000X E (E) E (F) 5000X.....	131
FIGURA 4.19 – MICROGRAFIAS PARA O CORPO DE PROVA DA AMOSTRA 5 NA IDADE DE 14 DIAS (A) 100X, (B), (C) 1000X, (D) E (E) 4000X E (F) 5000X	132
FIGURA 4.20 – MICROGRAFIAS PARA O CORPO DE PROVA DA AMOSTRA 5 NA IDADE DE 60 DIAS (A) 100X, (B)1000X E (C) 4000X	133
FIGURA 4.21 – MICROGRAFIAS DO CORPO DE PROVA COM 3 DIAS 5000X ..	134
FIGURA 4.22 – MICROGRAFIAS DO CORPO DE PROVA COM 60 DIAS 4000X	135
FIGURA 4.23 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DOS CORPOS DE PROVA COM 3 DIAS	135
FIGURA 4.24 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DOS CORPOS DE PROVA COM 60 DIAS	136
FIGURA 4.25 – DILATAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM 90 DIAS	138
FIGURA 4.26 – DILATAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM 180 DIAS	138

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - FORMAS DE MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS.....	25
QUADRO 2.2 - CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO.....	30
QUADRO 2.3 - CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL	33
QUADRO 2.4 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO VISANDO ATIVIDADES AGRÍCOLAS	36
QUADRO 2.5 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO RECREACIONAL	39
QUADRO 2.6 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO NO MEIO AMBIENTE.....	41
QUADRO 2.7 – PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA	44
QUADRO 2.8 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO INDUSTRIAL	46
QUADRO 2.9 – PRODUTOS QUÍMICOS INORGÂNICOS MAIS USADOS PARA COAGULAÇÃOEM PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES ..	56
QUADRO 2.10 – COAGULANTES E POLIELETRÓLITOS USADOS PARA O TRATAMENTO DE TURBIDEZ.....	59
QUADRO 2.11 – VALORES TÍPICOS DE TEMPO DE DETENÇÃO E GRADIENTE G PARA MISTURA E FLOCULAÇÃO EM EFLUENTES.....	61
QUADRO 2.12 – PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SISTEMAS DE FAD	65
QUADRO 3.1 – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA AS ANÁLISES COM AMOSTRAS DE ÁGUA RESIDUÁRIA	72
QUADRO 3.2 – PARÂMETROS BIOLÓGICOS PARA AS ANÁLISES COM AMOSTRAS DE ÁGUA RESIDUÁRIA	72
QUADRO 3.3 – ANÁLISES LABORATORIAIS PARA O LODO FÍSICO-QUÍMICO E PARA AS CINZAS.....	82
QUADRO 3.4 – ANÁLISES LABORATORIAIS PARA O CORPO-DE-PROVA.....	86
QUADRO 4.1 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A CARACTERIZAÇÃO DA	

ÁGUA RESIDUÁRIA	93
QUADRO 4.2 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A DETERMINAÇÃO DO pH, DO TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO ÓTIMOS DOS COAGULANTES	94
QUADRO 4.3 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES ÓTIMAS DOS AUXILIADORES DE COAGULAÇÃO.....	95
QUADRO 4.4 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE SEDIMENTAÇÃO	96
QUADRO 4.5 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE FLOTAÇÃO	98
QUADRO 4.6 – COMPARAÇÃO DAS REDUÇÕES DE DQO NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO .	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CATEGORIAS DE ÁGUA DE ACORDO COM A SUA QUALIDADE..	42
TABELA 3.1 - COMPOSIÇÕES DO CORPO-DE-PROVA	83
TABELA 4.1 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA A CINZA	102
TABELA 4.2 - RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA A CINZA	103
TABELA 4.3 – ANÁLISE DE EDS DA ÁREA GERAL DA MICROGRAFIA DA CINZA	107
TABELA 4.4 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O LODO	107
TABELA 4.5 – RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA O LODO	108
TABELA 4.6 - ANÁLISE DE EDS DA ÁREA GERAL DA MICROGRAFIA DO LODO	111
TABELA 4.7 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA A CAL..	112
TABELA 4.8 - RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA A CAL	112
TABELA 4.9 - MUDANÇA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DURANTE DIAS DE CURA.....	116
TABELA 4.10 - ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA À ÁGUA NO 60º DIA.....	118
TABELA 4.11 - ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA À ÁGUA NO 90º DIA.....	119
TABELA 4.12 - ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA À ÁGUA NO 180º DIA.....	119
TABELA 4.13 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA A MISTURA SECA	121
TABELA 4.14 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 3 DIAS	123
TABELA 4.15 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 14 DIAS	125
TABELA 4.16 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 60 DIAS	126
TABELA 4.17 - RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O	

CORPO DE PROVA DE 180 DIAS	128
TABELA 4.18 - MUDANÇAS DE COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DE AMOSTRAS DE COMPOSIÇÃO 5 DURANTE A CURA.....	130
TABELA 4.19 - ANÁLISE DE EDS DA ÁREA GERAL DA MICROGRAFIA DO CORPO DE PROVA EM 3 E 60 DIAS.....	136
TABELA 4.20 - RESULTADOS DA DILATOMETRIA PARA OS CORPOS DE PROVA COM 90 DIAS	137
TABELA 4.21 - RESULTADOS DA DILATOMETRIA PARA OS CORPOS DE PROVA COM 180 DIAS	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CI	Carbono inorgânico
CP	Corpo de prova
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono orgânico total
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CSS	Conjunto de sólidos suspensos
CST	Conjunto de sólidos totais
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
DRX	Difratometria de Raios X
EDS	<i>Energy Dispersive System</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de tratamento de efluentes
FAD	Flotação por ar dissolvido
FRX	Fluorescência de Raios X
G	Gradiente de velocidade
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
LABEAM	Laboratório de Engenharia Ambiental Prof. Francisco Borsari Netto
MDF	<i>Medium density fiberboard</i>
MDP	<i>Medium density particleboard</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NMP/100ml	Número mais provável de Coliformes em 100 ml
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OSB	<i>Oriented strand board</i>
PAC	Policloreto de alumínio
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
rpm	Rotações por minuto
SEMA	Secretaria Estadual de Meio Ambiente
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SST	Sólidos suspensos totais
ST	Sólidos totais
UH	Unidade Hazen
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	22
2.2 PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO	23
2.3 MINIMIZAÇÃO NO LANÇAMENTO DE RESÍDUOS	24
2.3.1 Reúso	26
2.3.1.1 Reúso planejado para fins potáveis	28
2.3.1.1.1 Reúso potável direto	28
2.3.1.1.2 Reúso potável indireto	29
2.3.1.2 Reúso planejado para fins não potáveis	32
2.3.1.2.1 Reúso planejado de água para fins urbanos não potáveis	32
2.3.1.2.2 Reúso planejado de água para fins agrícolas	35
2.3.1.2.3 Reúso planejado de água para fins recreacionais	38
2.3.1.2.4 Reúso planejado de água no meio ambiente.....	40
2.3.1.2.5 Reúso planejado de água para fins industriais	42
2.4 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS	47
2.5 INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF	49
2.5.1 O processo de fabricação de painéis de MDF	49
2.5.2 Geração de efluentes líquidos e resíduos sólidos	51
2.5.3 Tratamento físico-químico do efluente industrial por coagulação/floculação.....	52
2.5.3.1 Coagulação	54
2.5.3.2 Polímeros.....	57
2.5.3.3 Mistura e Floculação	59
2.5.3.4 Sedimentação	62
2.5.3.5 Flotação	63
2.5.4 Disposição do resíduo	65
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	66
3.1 INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF	66
3.1.1 Coleta das amostras	70

3.2	MINIMIZAÇÃO NO LANÇAMENTO DE RESÍDUOS	71
3.2.1	Caracterização da água residuária.....	71
3.2.2	Ensaio de pós-tratamento por coagulação/floculação	73
3.2.2.1	Materiais	73
3.2.2.2	Métodos para coagulação/floculação seguido de sedimentação	78
3.2.2.2.1	Determinação da melhor faixa de pH e do tempo de sedimentação	78
3.2.2.2.2	Determinação da concentração dos coagulantes	79
3.2.2.2.3	Determinação da concentração dos auxiliares de coagulação	80
3.2.2.3	Métodos para coagulação/floculação seguido de flotação	80
3.2.3	Comparação com padrões de reúso	80
3.3	REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS	81
3.3.1	Caracterização das matérias-primas	82
3.3.2	Confeção dos corpos de prova	83
3.3.3	Caracterização dos corpos de prova	85
3.3.3.1	Análise de resistência à compressão uniaxial.....	86
3.3.3.2	Análise de absorção e resistência à água.....	87
3.3.3.3	Análise de Fluorescência de Raios X.....	88
3.3.3.4	Análise de Difractometria de Raios X	89
3.3.3.5	Análise de perda a fogo	89
3.3.3.6	Análise de microscopia eletrônica de varredura com microanálise química (MEV-EDS)	90
3.3.3.7	Análise de dilatométrica	90
3.3.4	Comparação com padrões da legislação brasileira	91
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.1	MINIMIZAÇÃO NO LANÇAMENTO DE RESÍDUOS	92
4.1.1	Caracterização da água residuária.....	92
4.1.2	Ensaio de pós-tratamento por coagulação/floculação	94
4.1.2.1	Coagulação/floculação seguido de sedimentação	94
4.1.2.2	Coagulação/floculação seguido de flotação	97
4.1.2.3	Comparação dos ensaios de coagulação/floculação seguido de sedimentação e flotação	99
4.1.3	Comparação com padrões de reúso	101
4.2	REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS	102
4.2.1	Caracterização das matérias-primas	102

4.2.1.1 Cinza da queima da madeira	102
4.2.1.2 Lodo físico-químico de ETE	107
4.2.1.3 Resíduo da produção de cal	112
4.2.2 Confeção e caracterização dos corpos de prova.....	114
4.2.2.1 Análise de resistência à compressão.....	115
4.2.2.2 Análise de absorção e resistência à água.....	118
4.2.2.3 Análise de Difratometria de Raios X	121
4.2.2.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura com microanálise química (MEV-EDS)	130
4.2.2.5 Análise de dilatometria.....	137
4.2.3 Comparação com padrões da legislação brasileira	139
4.2.4 Considerações sobre o reaproveitamento de resíduos	139
5. CONCLUSÕES	141
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	142
REFERÊNCIAS.....	143

1 INTRODUÇÃO

A crescente escassez da água bem como a necessidade de se evitar desperdícios dentro da indústria torna mais importante a busca por meios de reduzir a geração dos efluentes do que de tratar os mesmos.

Uma das formas de minimizar o volume de captação de água potável e o descarte de efluentes é o reúso da água dentro da unidade industrial. A aplicação desta prática vem crescendo, influenciada por fatores como a cobrança pelo uso e descarte de água e efluentes, o custo crescente da água potável, diminuição das áreas disponíveis para disposição de resíduos e exigências cada vez mais severas na emissão e disposição dos efluentes no meio natural.

Para se alcançar os parâmetros de qualidade para reúso, faz-se necessário incluir no tratamento do efluente sistemas mais avançados, podendo ser físicos, químicos e eventualmente biológicos (METCALF & EDDY, 2003 e MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Outra necessidade enfrentada pela indústria é a minimização de resíduos, pois esta possibilita o desenvolvimento sustentável a partir da preocupação ambiental e a redução dos custos de produção (CRITTENDEN e KOLACZKOWSKI, 1995). Com medidas que evitam, eliminam ou reduzam os resíduos gerados na fonte, a minimização pode ainda permitir o reúso ou reciclagem de resíduos. Diminuindo assim seu gasto com tratamento e disposição, e ainda protegendo o meio ambiente. Dentre as vantagens que podem ser citadas estão: (i) redução de custos de monitoramento, controle, tratamento, gerenciamento e disposição de resíduos; (ii) redução do consumo de matérias-primas; (iii) redução de riscos de saúde e segurança dos funcionários expostos a resíduos perigosos; (iv) redução dos riscos ambientais que acarretam em uma facilidade maior em conseguir licenças e financiamentos, além de melhorar a imagem pública da empresa, a tornando com maior rentabilidade e eficiência (CENDOFANTI, 2005).

Uma possibilidade de reutilização de resíduos sólidos industriais é proporcionar a ele valor agregado, através da formação de novos produtos que possam ser utilizados na indústria em questão, como também ser vendidos para outras empresas.

O setor industrial de painéis de madeira (MDF - *Medium Density Fiberboard* -

e MDP - *Medium Density Particleboard*) tem apresentado forte dinamismo, no mundo e, em especial, no Brasil. A produção brasileira de painéis em geral, em 2005, foi de 7,7 milhões de m³, um aumento de 9,5% ao ano desde 1995. A produção especificamente de painéis de MDF em 2010 foi 3,0 milhões de m³ no Brasil, dos quais 24 mil de m³ foram exportados e 2,5 milhões de m³ utilizados em consumo interno (ABIPA, 2012). Esse mercado vem sofrendo mudanças, em função dos seguintes fatores: busca de alternativas à madeira maciça; modernização tecnológica do parque fabril, que proporcionou a oferta de novos produtos (MDF, OSB - *Oriented Strand Board*) e a melhoria da qualidade (a evolução do aglomerado para MDP); redução dos juros e melhoria da renda, que deram forte impulso à construção civil e ao setor de móveis, ambos consumidores de painéis de madeira (MATTOS *et al.*, 2008).

O Brasil está entre os mais avançados do mundo na fabricação de painéis de madeira reconstituída. É também o país com o maior número de fábricas de última geração. Com investimentos contínuos em tecnologia e automação, as empresas construíram versáteis e modernos parques industriais destinados à instalação de novas unidades, à atualização tecnológica das plantas já existentes, à implantação de linhas contínuas de produção e aos novos processos de impressão, de impregnação, de revestimento e de pintura (ABIPA, 2011).

A necessidade de minimizar o consumo de água potável e o descarte de efluentes tem ganhado espaço dentro da indústria uma vez que tais medidas proporcionam ganhos tanto ambientais como econômicos. A proibição da queima do lodo de estações de tratamento físico-químico de efluentes em caldeiras especificada pelo Artigo 3 da Resolução SEMA 42, de 22 de julho de 2008 (IAP, 2011), também impulsiona às indústrias a buscar novas formas de disposição e até mesmo reaproveitamento do resíduo gerado. Adicionar a este resíduo um valor agregado que proporcione a formação de um produto comercial é vantajoso, pois diminui possíveis gastos com a disposição do mesmo e implica no ganho econômico pela sua venda a outros setores.

Este trabalho se propôs estudar o pós-tratamento da água residuária objetivando seu reúso, bem como gerar um novo produto a partir de alguns resíduos sólidos gerados na indústria de painéis de MDF (lodo físico-químico e cinzas da queima da madeira), possibilitando a minimização de sua disposição final e reaproveitamento.

OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar uma tecnologia de pós-tratamento de água residuária, a fim de adequá-la aos padrões de reúso, bem como realizar uma proposta de aproveitamento do lodo físico-químico, provenientes do processo produtivo de uma fábrica de painéis de MDF.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa as seguintes atividades foram realizadas:

- caracterizar a água resíduária tratada, a cinza e o lodo físico-químico produzidos durante o processo produtivo de uma indústria de painéis de MDF;
- aplicar tecnologias de pós-tratamento físico-químico por coagulação/floculação seguido de sedimentação e flotação, visando o uso do despejo tratado;
- estudar combinações de lodo do tratamento físico-químico de águas residuárias e cinzas da incineração da madeira de uma indústria de painéis de MDF com resíduos da produção de cal como material ligante, para formação de um produto de construção civil de valor agregado e comercial, que atenda as normas brasileiras;
- estudar processos físico-químicos de interação de componentes usados para a fabricação dos materiais desenvolvidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas, com base em literatura recente, informações sobre ações integradas a concepção de tecnologia limpa, cujo um dos objetivos é a redução de impactos ambientais através de mudanças que visem sua minimização no lançamento e reaproveitamento de resíduos gerados no processo industrial.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Melhorias no desempenho ambiental de uma indústria trazem também benefícios econômicos aumentando a produtividade, reduzindo a quantidade de insumos, reduzindo o desperdício e aumentando a reciclagem de materiais. A aplicação dos conceitos de redução, reutilização e reciclagem podem resultar em economia financeira real para qualquer organização. A redução de resíduos e do consumo de energia proporciona benefícios de ordem financeira na indústria, uma vez que, segundo Gilbert (1995), a coleta e a destinação final dos resíduos são operações muito onerosas. Quanto menos as empresas tiverem a remover, menores serão os custos envolvidos.

A reciclagem de materiais para o reaproveitamento, a reutilização ou simplesmente o uso, podem representar uma alternativa efetiva de redução de custo no que se refere ao tratamento e à disposição de resíduos. Entretanto, deve ser enfatizado que a eliminação e a minimização do resíduo na fonte são as opções preferenciais num gerenciamento de resíduos, como visto na hierarquia proposta pela União Européia conforme a Figura 2.1.



FIGURA 2.1 – HIERARQUIA DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS APROVADA PELA UNIÃO EUROPÉIA

FONTE: O autor (2011)

2.2 PREVENÇÃO À POLUIÇÃO

A prevenção à poluição refere-se a qualquer prática, processo, técnica e tecnologia que visem à redução ou eliminação em volume, concentração e toxicidade dos poluentes na fonte geradora. Inclui também modificações nos equipamentos, processos ou procedimentos, reformulação ou replanejamento de produtos, substituição de matérias-primas, melhorias nos gerenciamentos administrativos e técnicos da empresa e otimização do uso das matérias-primas, energia, água e outros recursos naturais. Para implementar um Programa de Prevenção à poluição em uma empresa sugere-se que sejam seguidas as seguintes ações:

- comprometimento da direção da empresa;
- definição da equipe do Programa;
- elaboração de uma Declaração de Intenções;
- estabelecimento de objetivos e metas;
- elaboração de um cronograma de atividades;
- disseminação das informações sobre o Programa;
- levantamento de dados;

- definição de indicadores de desempenho;
- identificação de oportunidades do Programa;
- seleção de oportunidades do Programa;
- levantamento de tecnologias;
- avaliação econômica;
- implantação das medidas do Programa;
- avaliação dos resultados do Programa e
- manutenção do Programa.

Dentre os itens citados, dois deles que se destacam é o real comprometimento da direção da empresa e a manutenção do programa após iniciado seu uso. A continuidade do mesmo está baseado principalmente no retorno positivo provindo da implementação do programa, e este é visto após a avaliação econômica. Qualquer medida do programa que oferece uma redução de custo direto ou indireto relacionada à geração, manuseio e tratamento de resíduos ou de custos operacionais e que não envolva custos de investimentos iniciais, pode ser considerada economicamente viável. Para as medidas de prevenção à poluição que envolvam custos de investimento em capital e de instalação iniciais, o uso de índices de lucratividade deve ser adotado como, por exemplo, o cálculo do período de retorno do capital inicial investido ou valor presente líquido ou outros índices utilizados na matemática financeira, com a consideração da economia de custo relacionada à redução da geração de resíduos (PAWLOWSKY, 2010).

Investimentos em prevenção à poluição podem afetar os custos relacionados ao atendimento da legislação ambiental, imagem da empresa, saúde e segurança do trabalhador, prêmios pagos à seguradoras, custos indiretos e outros custos relacionados ao gerenciamento da empresa como um todo, trazendo benefícios indiretos de difícil mensuração à curto prazo, mas significativos à empresa como um todo a médio e longo prazo.

2.3 MINIMIZAÇÃO NO LANÇAMENTO DE RESÍDUOS

A minimização de resíduos envolve qualquer técnica, processo ou atividade que serve para evitar, eliminar, ou reduzir o resíduo na fonte, usualmente dentro da unidade produtiva, ou permitir o reuso ou reciclagem do resíduo para um propósito

útil (PAWLOWSKY, 2010). A minimização de resíduos foi definida pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (*Environmental Protection Agency* - EPA) como “toda ação tomada para reduzir a quantidade e/ou toxicidade dos resíduos que requerem disposição final” (EPA, 1988). Já para a UNEP (2006), minimizar resíduos é o resultado da combinação da conservação de matérias-primas, água e energia, da eliminação de materiais tóxicos e perigosos e da redução da concentração e/ou toxicidade das emissões, sejam líquidas, sólidas ou atmosféricas do processo produtivo.

Dentre as formas de minimização de resíduos estão: melhoria nas práticas operacionais, manutenções preventivas nas áreas produtivas e de armazenamento, mudança de processo ou tecnologia, substituição de matéria-prima ou de equipamentos, reciclagem interna ao processo e reúso (ALVES, 1995). Estas são apresentadas no Quadro 2.1. E a prática do reúso é mais detalhada na seção 2.3.1.

QUADRO 2.1 – FORMAS DE MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS (continua)

Formas de minimização	Característica
Melhorias nas práticas operacionais	consistem na padronização dos parâmetros operacionais (temperatura, vazão, volume, tempo, etc.) e dos procedimentos para execução de uma tarefa, aliados a uma sistemática que garanta a efetividade na execução das operações industriais.
Manutenções preventivas nas áreas produtivas e de armazenamento	consistem no estabelecimento de um programa de manutenção periódica nas áreas produtivas e de armazenamento, com o intuito de se antecipar aos problemas, de modo a evitar incidentes que venham a ocasionar, por exemplo: a interrupção na produção, perda de material, contaminação devido a vazamento, etc.

QUADRO 2.1 – FORMAS DE MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS (conclusão)

Formas de minimização	Característica
Mudança e aperfeiçoamento do processo ou da tecnologia	é a substituição de um processo/tecnologia por outra menos poluidora, ou seja, adoção de uma tecnologia limpa. No aperfeiçoamento pode ser a melhoria da eficiência do tratamento do efluente.
Substituição interna de matérias-primas ou de equipamentos	é uma técnica que visa substituir uma substância tóxica utilizada como matéria-prima em um processo industrial, por outra menos tóxica e que produza os mesmos efeitos desejados no produto final, sem prejuízo da sua qualidade. Já a respeito dos equipamentos sua substituição consiste na troca por outro menos poluidor, mais eficiente, mais econômico, ou ainda, realizar alguma alteração nesse equipamento, que possa vir a conferir melhorias desejadas.
Reciclagem interna ao processo	é qualquer técnica ou tecnologia que permita a utilização de um resíduo como um substituto eficiente para um produto comercial ou como matéria-prima em um processo industrial. Também se refere à recuperação de frações constituintes úteis dentro de um material refugado ou remoção de contaminantes de um resíduo de forma a permitir sua reutilização.
Reúso	qualquer prática ou técnica que permita a reutilização de um resíduo, sem que o mesmo seja submetido a um tratamento prévio.

FONTE: Pawlowsky (2010)

2.3.1 Reúso

A prática de reúso é um dos componentes de gerenciamento de águas e efluentes, e é um instrumento para a preservação dos recursos naturais e controle da poluição ambiental, mas deve estar vinculada a outras medidas que busquem a

racionalização do uso da água e demais recursos naturais (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Uma definição bastante aceita para o termo reúso de água é “uso de efluentes tratados para fins benéficos, tais como irrigação, uso industrial e fins urbanos não potáveis” (MIERZWA, 2002). Avaliando-se algumas atividades, é possível identificar muitas que toleram água com grau de qualidade inferior ao da potável ou daquela utilizada em muitos processos industriais (MIERZWA e HESPANHOL, 2005; CNRH, 2005). Mesmo na agricultura, a irrigação de determinadas culturas poderia ser feita com efluentes domésticos previamente tratados, que é uma prática bastante comum em países de baixa disponibilidade de água (HARUVY, 1998; ANGELAKIS e BONToux, 2001).

Um dos conceitos mais antigos sobre reúso de água veio através da WHO – Organização Mundial da Saúde (1973) onde é definido reúso direto, indireto e reciclagem interna:

- Reúso direto: é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquíferos e água potável.
- Reúso indireto: ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para o uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída.
- Reciclagem: é o reúso da água internamente às instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

Além destas o reúso pode ainda ser dividido em planejado ou não planejado. De qualquer forma, porém, a prática de reúso não é tão imediata como se imagina, já que a água de reúso deve apresentar características físicas, químicas e biológicas adequadas a cada uso. Deve-se considerar também que a concentração de determinados contaminantes aumenta à medida que se aplica o reúso, podendo ocorrer o comprometimento das atividades nas quais a água de reúso é aplicada e do sistema de tratamento de efluentes.

É por essa razão que, antes da implantação da prática de reúso ser aplicada é necessária uma avaliação de potencial, com base nas características da água disponível para captação, do efluente gerado e da água para as aplicações de reúso, além dos padrões de emissão dos efluentes (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

A partir dessas informações, por meio de um balanço material, é possível determinar a fração de efluente a ser reutilizado. É imprescindível ter à disposição os dados de qualidade e quantidade da água captada e do efluente lançado para o meio ambiente. Assim pode-se determinar o volume de água perdido ou incorporado aos produtos e a quantidade de substâncias químicas adicionadas à água durante sua utilização. Pode-se avaliar individualmente cada parâmetro físico, químico e/ou biológico, ou pode-se escolher um único parâmetro que represente um conjunto de substâncias, o que simplifica a elaboração do balanço material.

WESTERHOFF (1984) classifica reúso de água em duas grandes categorias: potável e não potável. Por sua praticidade e facilidade, essa classificação, foi adotada pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), seção São Paulo, tendo sido amplamente divulgada em sua série de Cadernos de Engenharia Sanitária e Ambiental em 1992. Neste trabalho, esta classificação é apresentada e também acrescentada nas seções 2.3.1.1 e 2.3.1.2 que seguem.

2.3.1.1 Reúso planejado para fins potáveis

O reúso para fins potáveis acontece de duas maneiras: de forma direta ou indireta. Segundo METCALF & EDDY (2003), três classes de constituintes de especial interesse podem afetar a água recuperada ou de reúso para uso potável, sendo estes: (1) vírus entéricos; (2) constituintes orgânicos incluindo, produtos químicos industriais, resíduos residenciais e medicamentos, e; (3) metais pesados.

As ramificações de vários destes constituintes relacionados à efeitos na saúde não são bem conhecidos, e, como resultado, as agências ambientais de regulação em todo o mundo procedem com muito cuidado no sentido de permitir a aplicação de água recuperada em fontes de água potável.

2.3.1.1.1 Reúso potável direto

O reúso potável direto ocorre quando o esgoto recuperado, por meio de tratamento avançado é diretamente reutilizado no sistema de água potável.

Nos Estados Unidos, segundo US EPA (2004), a mais extensa pesquisa visando o reúso tem sido conduzida em Denver, Colorado; Tampa, Flórida; e San Diego, Califórnia. Um considerável investimento em pesquisas para reúso potável

tem sido feito em Denver, Colorado, há mais de 20 anos. A pesquisa inclui operação de uma planta de água recuperada com vazão de 44 l/s por diferentes processos por um período superior a dez anos. A água resultante do processo foi relatada como tendo qualidade superior a muitas fontes de água da região.

Como o reúso potável direto é raro, existem poucas fontes de dados no mundo para se comparar ou mesmo apresentar.

2.3.1.1.2 Reúso potável indireto

O reúso potável indireto é o caso em que o esgoto, após tratamento, é disposto na coleção de águas superficiais ou subterrâneas para diluição, purificação natural e subsequente captação, tratamento e finalmente utilizado como água potável. Dentro deste conceito, segundo MANCUSO e SANTOS (2003), destacam-se as seguintes possibilidades:

- Descarga do efluente tratado nos mananciais de superfície, com captação da mistura – efluente tratado e água natural – à jusante e diretamente no manancial;
- As águas dos mananciais de superfície, que receberam descargas de efluentes tratados à montante, são captadas indiretamente por meio de sua infiltração pelas margens do corpo de água à jusante, através de poços;
- Recarga de aquífero subterrâneo pela infiltração direta de efluentes tratados, ou de águas de mananciais superficiais que tenham recebido descargas de efluente à montante. As águas do aquífero subterrâneo são captadas à jusante através de poços. A recarga artificial do aquífero pode ser feita pelos processos de infiltração-percolação ou injeção direta.

A EPA (2004), Agência de Proteção Ambiental americana, em seu guia de reúso de água, sugere diretrizes para o reúso de água em países e localidades que não possuem legislação formada. Entretanto, deve-se ter consciência de que estas diretrizes mostradas no Quadro 2.2 não devem ser consideradas como definitivas, mas sim uma orientação para a prática do reúso de água. Este quadro também apresenta os tipos de reúso, o tratamento mínimo que o efluente deve possuir, a qualidade que a água de reúso deve possuir, o tipo de monitoramento e sua periodicidade, a distância mínima que a prática do reúso deve ter de fontes de água potável e alguns comentários importantes à prática do mesmo.

QUADRO 2.2 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO (continua)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Potável Indireto</i></p> <p>Recarga de águas subterrâneas por infiltração / percolação em aquíferos potáveis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Desinfecção; - Pode também ser preciso filtração e, se houver necessidade, tratamento avançado de efluentes³. 	<ul style="list-style-type: none"> - Secundária; - Desinfetada; - Chegar aos padrões de água potável depois de percolado através da zona não saturada. 	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo; - Padrões para água potável – trimestral; - Outros⁹ – dependem dos constituintes; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua. 	<ul style="list-style-type: none"> - 150 metros de poços de extração. Pode variar dependendo do tratamento feito e das condições de especificação local. 	<ul style="list-style-type: none"> - A espessura de solo sobre as águas subterrâneas (Ex.: espessura da zona não saturada (vadose zone)) deve ser de pelo menos 2 metros no ponto mais alto do aquífero subterrâneo; - A água recuperada deve ficar retida nas águas subterrâneas por pelo menos 6 meses antes da retirada; - Níveis de tratamento recomendados no campo dependem de valores tais como tipo de solo, taxa de percolação, espessura da zona não saturada (vadose zone), qualidade da água nativa e diluição; - O monitoramento dos poços é necessário para detectar a influência da operação de recarga nas águas subterrâneas; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis depois da percolação através da zona não saturada.
<p><i>Reúso Potável Indireto</i></p> <p>Recarga de águas subterrâneas por injeção em aquíferos potáveis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Filtração; - Desinfecção; - Tratamento avançado de efluentes³. 	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH = 6,5-8,5; - ≤ 2 NTU⁵; - coliformes fecais não detectáveis em 100 ml^{6, 7}; - 1 mg/l Cl₂ residual (mín)⁴; - ≤ 3 mg/l de COT; - ≤ 0,2 mg/l TOX; - Chegar aos padrões de água potável. 	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH – diário; - Turbidez - contínua; - Coliformes totais – diário; - Cl₂ residual – contínuo; - Padrões para água potável – trimestral; - Outros⁹ – dependem dos constituintes. 	<ul style="list-style-type: none"> - 600 metros de poços de extração. Pode variar dependendo das condições de especificação local. 	<ul style="list-style-type: none"> - A água recuperada deve ficar retida nas águas subterrâneas por pelo menos 9 meses antes da retirada; - O monitoramento dos poços é necessário para detectar a influência da operação de recarga nas águas subterrâneas; - Os limites de qualidade recomendados devem ser alcançados no ponto de injeção; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - Um alto residual de cloro e/ou longo tempo de contato devem ser necessários para assegurar que vírus e parasitas estejam inativos ou destruídos.

QUADRO 2.2 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO (conclusão)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Potável Indireto</i></p> <p>Acréscimo/ aumento de fontes superficiais.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Filtração; - Desinfecção; - Tratamento avançado de efluentes³. 	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH = 6,5-8,5; - ≤ 2 NTU⁵; - Coliformes fecais não detectáveis em 100 ml^{6,7}; - 1mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁴; - ≤ 3 mg/l de COT; - Chegar aos padrões de água potável. 	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH – diário; - Turbidez - contínua; - Coliformes totais - diário; - Cl₂ residual – contínuo; - Padrões para água potável – trimestral; - Outros⁹ – dependem dos constituintes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Especificado no local; 	<ul style="list-style-type: none"> - Níveis de tratamento recomendados no campo dependem de valores tais como a qualidade da água receptora, o tempo e distância do ponto de retirada, diluição e subsequente tratamento prévio de distribuição para usos potáveis; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - Um alto residual de cloro e/ou longo tempo de contato devem ser necessários para assegurar que vírus e parasitas estejam inativos ou destruídos.

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Processos de tratamento avançado de efluentes incluem clarificação química, adsorção com carvão ativado, osmose reversa e outros processos com membranas, air stripping, ultrafiltração e troca iônica

⁴ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁵ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/l

⁶ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas).

⁷ O n° de coliformes fecais não devem exceder 14/100 ml em nenhuma amostra

⁸ O n° de coliformes fecais não devem exceder 800/100 ml em nenhuma amostra.

⁹ O monitoramento deve incluir compostos orgânicos e inorgânicos, ou classes de compostos, que são conhecidos ou suspeitos de serem tóxicos, carcinogênicos, teratogênicos, ou mutagênicos e que não estejam incluídos nos parâmetros de água potável

2.3.1.2 Reúso planejado para fins não potáveis

A finalidade da utilização de esgoto tratado para atividades específicas consiste em racionalizar água potável, destinando esta apenas para as atividades que realmente exijam água segundo os padrões de potabilidade.

2.3.1.2.1 Reúso planejado de água para fins urbanos não potáveis

A modalidade de reúso não potável para fins urbanos é caracterizada pela utilização de efluente tratado para suprir as várias necessidades urbanas que admitem qualidade inferior à potável. Segundo a US EPA (2004), o reúso urbano não potável é subdividido em duas categorias: as de áreas com acesso controlado e não controlado.

O reúso urbano com acesso não controlado envolve o uso de água de reúso diretamente nos locais onde o público tem contato. Por isto esta água necessita de um alto grau de tratamento. Em todos os estados americanos que possuem regulamentação, especificam no mínimo tratamento secundário e desinfecção para água com esta finalidade.

O uso de água de reúso para locais onde o acesso público não é controlado, são: irrigação de parques, playgrounds, pátios de escolas e residências onde o acesso público não é controlado; descarga em aparelhos sanitários, ar condicionado, prevenção contra incêndio, construção civil, limpeza de ruas, fontes ornamentais e lagos e espelhos de água com função estética.

Quando o acesso é controlado em áreas onde exista a aplicação de água de reúso, esta pode ter um grau inferior de tratamento comparado com a água aplicada em áreas de acesso não controlado.

Os usos de água de reúso onde o acesso público pode ser controlado, são: a irrigação de campos de golf, cemitérios e rodovias intermediárias.

A US EPA (2004) também sugere em seu guia de reúso de água, diretrizes para países e localidades que não possuem legislação formada. O Quadro 2.3 apresenta estes critérios e diretrizes para a prática do reúso de água na área urbana.

QUADRO 2.3 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL (continua)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Urbano</i> Todos os tipos de áreas paisagísticas para irrigação (Ex.: campos de golfe, parques, cemitérios). Também lavagem de veículos, descarga sanitária, sistemas de proteção contra incêndio, ar condicionado e outros usos com acesso ou exposição similar a água.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Filtração; - Desinfecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH= 6-9; - ≤ 10mg/l DBO; - ≤ 2 NTU ⁴; - Coliformes fecais não Detectáveis em 100ml ^{5, 6}; - 1mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH – semanal; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - 15 metros de fontes fornecedoras de água potável. 	<ul style="list-style-type: none"> - Em locais de irrigação com acesso controlado onde o projeto e as medidas operacionais reduzem significativamente o potencial do contato público com água recuperada, um nível mais baixo do tratamento (Ex.: Trat. secundário e desinfecção atingindo ≤ 14 coliformes fecais em 100 ml) podem ser apropriados; - A adição de coagulante e/ou polímero antes da filtração pode ser necessária para chegar às recomendações de qualidade da água; - Cloro residual de 0.5 mg/l ou um mais no sistema da distribuição é recomendado para reduzir odores, limo e o crescimento bacteriano; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis.
<p><i>Construção Civil</i> Compactação de solo, controle de poeira, lavagem de agregados e confecção de concreto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Desinfecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 coliformes fecais em 100 ml ^{5, 7}; - 1 mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³. 	<ul style="list-style-type: none"> - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo. 		<ul style="list-style-type: none"> - O contato do trabalhador com a água deve ser minimizado; - Um alto nível de desinfecção (Ex.: ≤ 14 coliformes fecais em 100 ml) deve ser alcançado quando o trabalho possuir provável contato frequente com água recuperada.

QUADRO 2.3 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL (conclusão)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reservatórios e/ou lagos para paisagismo</i></p> <p>Reservatórios e lagos de função estética onde o contato público com a água não é permitido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Desinfecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{5, 7}; - 1 mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mínimo de 150 metros de distância de fontes de água potável se fundo não for impermeável. 	<ul style="list-style-type: none"> - A remoção de nutrientes pode ser necessária para evitar o crescimento de algas nos reservatórios/lagos; - A descloração pode ser necessária para proteger espécies aquáticas da fauna e flora.

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/l

⁵ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁶ O número de coliformes fecais não devem exceder 14/100 ml em nenhuma amostra

⁷ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100ml em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

2.3.1.2.2 Reúso planejado de água para fins agrícolas

O reúso não potável para fins agrícolas é caracterizado pela utilização de efluente tratado para irrigação de culturas que, segundo WESTERHOFF (1984), são apresentados em dois grupos:

- Primeiro grupo: plantas não comestíveis: silvicultura, pastagens, fibras e sementes.
- Segundo grupo: aqui são consideradas as plantas consumidas cozidas e as plantas consumidas cruas.

O reúso além da irrigação é aplicável também para dessedentação de animais. Deve-se salientar que, quando da prática da modalidade de reúso agrícola, via de regra há como subproduto a recarga do lençol subterrâneo pela percolação através do solo.

O reúso não potável para fins agrícolas é a possibilidade mais estudada e também a mais regulamentada. A demanda atual de água para o setor agrícola brasileiro representa, atualmente, 70% do uso total e possui forte tendência para chegar a 80% até o final desta década (MANCUSO e SANTOS, 2003).

A US EPA (2004), em seu guia de reúso de água, sugere diretrizes para o reúso agrícola na irrigação de culturas não processadas comercialmente, culturas processadas e para pastagem, cultura de grãos, fibras e forragens. O Quadro 2.4 apresenta estes critérios e diretrizes para a prática do reúso de água em atividades agrícolas.

QUADRO 2.4 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO VISANDO ATIVIDADES AGRÍCOLAS
(continua)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Agrícola</i> -Culturas não processadas comercialmente</p> <p>Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, incluindo alimentos comidos cru.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Filtração; - Desinfecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH= 6-9; - ≤ 10 mg/l DBO; - ≤ 2 NTU ⁴; - Coliformes fecais não detectáveis em 100 ml ^{5, 6}; - 1 mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH – semanal; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mínimo de 15 metros de distância de fontes de água potável; 	<ul style="list-style-type: none"> - A adição de coagulante e/ou polímero antes da filtração pode ser necessária para chegar às recomendações de qualidade da água; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - Um alto residual de cloro e/ou longo tempo de contato devem ser necessários para assegurar que vírus e parasitas estejam inativos ou destruídos; - Altos níveis de nutrientes podem ser prejudiciais para algumas culturas durante certas fases do crescimento.
<p><i>Reúso Agrícola</i> -Culturas processadas comercialmente</p> <p>Irrigação superficial de pomares e vinhedos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Desinfecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH= 6-9; - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{5, 7}; - 1 mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mínimo de 90 metros de fontes de água potável; - Mínimo de 30 metros de áreas acessíveis ao público (se for irrigação por spray). 	<ul style="list-style-type: none"> - Se a irrigação for por spray, será necessário que o SST seja menor que 30 mg/l para evitar o entupimento das cabeças de aspersão (sprinkler heads). - Altos níveis de nutrientes podem ser prejudiciais para algumas culturas durante certas fases do crescimento.

QUADRO 2.4 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO VISANDO ATIVIDADES AGRÍCOLAS
(conclusão)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Agrícola</i> - Outros usos não sendo cultura de alimentos</p> <p>Pastagem para gado leiteiro; culturas de grãos, fibras e forragem.</p>	<p>- Secundário; - Desinfecção.</p>	<p>- pH= 6-9; - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{5, 7}; - 1mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³.</p>	<p>- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo.</p>	<p>- Mínimo de 90 metros de fontes de água potável; - Mínimo de 30 metros de áreas acessíveis ao público (se for irrigação por spray).</p>	<p>- Se a irrigação for por spray, será necessário que o SST seja menor que 30 mg/l para evitar o entupimento das cabeças de aspersão (sprinkler heads). - Altos níveis de nutrientes podem ser prejudiciais para algumas culturas durante certas fases do crescimento. - Gado leiteiro deve ser proibido de pastar por 15 dias depois do término da irrigação. Um alto nível de desinfecção (Ex.: ≤ 14 coliformes fecais em 100 ml) deve ser alcançado se este período de espera não for respeitado.</p>
<p><i>Irrigação de áreas com acesso restrito</i> Fazendas de gramas, áreas para silvicultura e outras áreas onde o acesso público é raro, proibido, restrito</p>	<p>- Secundário; - Desinfecção.</p>	<p>- pH= 6-9; - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{5, 7}; - 1mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³.</p>	<p>- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo.</p>	<p>- Mínimo de 90 metros de fontes de água potável; - Mínimo de 30 metros de áreas acessíveis ao público (se for irrigação: spray).</p>	<p>- Se a irrigação for por spray, será necessário que o SST seja menor que 30 mg/l para evitar o entupimento das cabeças de aspersão (sprinkler heads).</p>

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mín. de proteção para proteger as fontes de água potável de contaminações e para pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água.

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/l

⁵ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁶ O número de coliformes fecais não devem exceder 14/100 ml em nenhuma amostra

⁷ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100 ml em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

2.3.1.2.3 Reúso planejado de água para fins recreacionais

Esta classificação é reservada ao reúso direto de água para abastecimento de corpos de água superficiais como lagos, reservatórios, e rios usados para fins recreacionais, além de usos em paisagismo, como irrigação de jardins e parques públicos, lagos ornamentais e também na rega de campos esportivos. Segundo a US EPA (2004), o reúso não potável para fins recreacionais é subdividido em duas categorias: as de áreas com acesso controlado e não controlado.

Para reuso recreacional irrestrito, ou atividades de contato primário, como definido por Mierzwa e Hespanhol (2005), em que o público fica exposto ao contato direto com a água reutilizada, o grau de tratamento necessário é elevado. Porém, em atividades recreacionais de contato secundário, em que há um controle quanto ao contato direto com o público, a qualidade exigida para a água de reúso é inferior.

É importante salientar que quando aplicada a recarga de corpos hídricos, mesmo que para atividades como pesca e canoagem, que são definidas como de contato secundário e que, portanto não exigem tratamento terciário, há necessidade remoção dos nutrientes, caso estes estejam presentes em quantidades elevadas. Este controle é necessário de modo a evitar a proliferação de algas e manter a boa aparência das mesmas.

Em sua norma de procedimentos para o reúso de água, a US EPA sugere critérios e diretrizes para o reúso recreacional em lagos e reservatórios a países e localidades que não possuem legislação para este tipo de reúso. Nota-se que neste quadro sugestivo, não há diferença de critério para os usos em corpos de água que propiciem contato acidental, como pesca e esportes aquáticos e contato corporal total, como mergulho e natação. Estes critérios e diretrizes para a prática do reúso recreacional são apresentados no Quadro 2.5 a seguir:

QUADRO 2.5 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO RECREACIONAL

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso recreacional em lagos e/ou reservatórios</i></p> <p>Contato acidental (Ex.: pescaria e esportes aquáticos) e todo contato corporal permitido com água recuperada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Secundário; - Filtração; - Desinfecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH= 6-9; - ≤ 10 mg/l DBO; - ≤ 2 NTU ⁴; - Coliformes fecais não detectáveis em 100 ml ^{5, 6}; - 1 mg/l Cl₂ residual (mínimo) ³. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH – semanal; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mínimo de 150 metros de distância de fontes de água potável se fundo não for impermeável. 	<ul style="list-style-type: none"> - A descloração pode ser necessária para proteger espécies da fauna e flora; - A água recuperada não deve irritar a pele e olhos e deve estar limpa e sem cheiro; - A remoção de nutrientes pode ser necessária para prevenir o crescimento de algas nos reservatórios/lagos; - A adição de coagulante e/ou polímero antes da filtração pode ser necessária para chegar às recomendações de qualidade da água; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - A pesca de peixes em reservatórios/lagos pode ser consumida.

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada.

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/l

⁵ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁶ O número de coliformes fecais não devem exceder 14/100 ml em nenhuma amostra

2.3.1.2.4 Reúso planejado de água no meio ambiente

Esta classificação, segundo a US EPA (2004), está relacionada com o reúso de efluente tratado para recuperação e embelezamento de ambientes como *wetlands*, pântanos, habitat de animais selvagens e aumento ou manutenção de vazões de cursos de água.

No caso da aplicação de água recuperada para criação artificial de *wetlands* ou o melhoria de *wetlands* naturais, o trabalho se torna ainda mais importante, pois estes sistemas exercem uma função ambiental relevante na preservação de espécies aquáticas, na atenuação de fluxos hídricos e na melhoria da qualidade da água (MANCUSO e SANTOS 2003).

O reúso de efluentes tratados como manutenção de vazões em corpos de água, muitas vezes é citado como um conceito separado de forma de reúso, como é possível constatar em Mancuso e Santos (2003). Este autor apresenta esta modalidade com o objetivo de manter uma dada vazão num curso de água para diluir as cargas poluidoras a elas aportadas, além de também possibilitar a manutenção de vazões mínimas em épocas de estiagem.

No capítulo quatro da sua norma de procedimentos para reúso de água, a US EPA (2004), sugere diretrizes para o reúso de água recuperada em *wetlands*, pântanos, habitat de animais selvagens e aumento de vazão. O Quadro 2.6 apresenta estes critérios e diretrizes para a prática do reúso de água no meio ambiente.

QUADRO 2.6 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO NO MEIO AMBIENTE

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<i>Reúso no meio Ambiente</i> Wetlands, pântanos, habitat de animais selvagens, aumento de vazões.	- Variável; - Secundário e desinfecção (mínimo).	Variável mas não exceder: - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{3, 4} ;	- DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.		- A descloração pode ser necessária para proteger espécies da fauna e flora; - Possíveis efeitos nas águas subterrâneas devem ser avaliados; - Os requisitos da qualidade da água receptora podem exigir tratamento adicional; - A temperatura da água recuperada não deve afetar prejudicialmente o ecossistema;

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁴ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100 ml em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

2.3.1.2.5 Reúso planejado de água para fins industriais

A água na indústria pode ter diversas aplicações como: matéria-prima, uso como fluido auxiliar, uso para geração de energia, uso como fluido de aquecimento e/ou resfriamento, transporte e assimilação de contaminantes. Dessa maneira, entende-se que a água é um insumo imprescindível na indústria e que deve estar disponível na qualidade e quantidade necessárias para atender a cada uso específico, salientando-se que pode cumprir vários papéis numa mesma indústria.

Em virtude da sua aplicação e do grau de qualidade, a água pode ser enquadrada em uma das quatro categorias adaptadas da classificação de Higgins (1989), com base nas características das água superficiais de alguns rios da Região Sudeste (ANEEL, 2000), conforme a Tabela 2.1

TABELA 2.1 – CATEGORIAS DE ÁGUA DE ACORDO COM A SUA QUALIDADE

Grau de qualidade	Parâmetros			
	SDT (mg/l) ^a	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	Dureza (mg/l) ^b
Tipo I: água ultra pura	< 10	< 1	0	0
Tipo II: água de processo de alta qualidade	10 – 60	0 – 10	0	< 30
Tipo III: água tratada	20 – 60	0 – 10	0 – 10	30 – 75
Tipo IV: água bruta ou reciclada	60 – 800	10 – 150	10 – 100	-

Notas: (a) Valores baseados nos dados fornecidos pela ANEEL

(b) Valores baseados nos dados fornecidos pela ANEEL e pela classificação da água em função da dureza

FONTE: ANEEL (2000)

Segundo o Manual de Conservação para Reúso de Água, editado pela FIESP/CIESP, a viabilização desta prática ocorre devido às diversas possibilidades de aplicações no setor industrial as quais não exigem o uso de água potável, tais como:

- **Matéria Prima:** A água de reúso será incorporada ao produto final. Sendo assim o volume utilizado e a qualidade necessária dependerão do segmento da indústria em questão, podendo até mesmo exigir um grau de tratamento superior a da água potável.

- Fluido Auxiliar: A água auxiliará no preparo de suspensões ou soluções, compostos intermediários, reagentes químicos, para lavagem de peças ou ainda servirá como de veículo durante o processo industrial. Sua qualidade é dependente do ramo de atuação da indústria e da etapa a qual a água será aplicada. Caso esta água entre em contato com o produto final, sua qualidade será determinada pelo tipo de produto que se irá obter. Caso contrário, esta poderá apresentar um grau de qualidade menos restritivo que o da água potável.
- Geração de Calor: Envolve a transformação da energia cinética, potencial ou térmica acumulada na água, em energia mecânica e posteriormente elétrica por meio de caldeiras. Para geração de energia térmica a água deverá apresentar um grau de qualidade bastante elevado, de modo a torná-la isenta de dureza ou, caso seja uma caldeira de alta pressão, de qualquer tipo de sal, para que não ocorram problemas de corrosão e entupimento de tubulações.
- Torres de Resfriamento: A água é utilizada como fluido de transporte para remoção de calor de misturas reativas ou outros dispositivos que, quando submetidos a temperaturas elevadas, têm o seu desempenho comprometido ou ainda podem danificar equipamentos. De acordo com Metcalf & Eddy (2003), normalmente são quatro os tipos de problemas relacionados à qualidade da água em operações de torres de resfriamento: incrustações pelo acúmulo de sais, a corrosão metálica, crescimento biológico causado, por ventura, por microorganismos ou nutrientes presentes em excesso na água e a formação de *fouling* em trocadores de calor e condensadores devido ao acúmulo de depósitos orgânicos e inorgânicos nestes dispositivos.
- Outros usos: usos não nobres tais como lavagem dos pátios da fábrica, irrigação das áreas verdes, combate a incêndios.

Segundo diversos especialistas da área, as principais aplicações do reúso de água em uma indústria, objeto deste trabalho, podem ser observadas no Quadro 2.7. Estas são as atividades que mais consomem água em uma indústria e cujos padrões de qualidade não são muito exigentes, o que não impede que o reúso possa ser feito em qualquer outra atividade – desde que as características da água a ser utilizada atendam aos requisitos de qualidade exigidos (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

QUADRO 2.7 – PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

Aplicação	Referência
Refrigeração Alimentação de caldeira Água de processo Construção pesada	Asano, 1991
Refrigeração Alimentação de caldeira Água de processo Construção pesada Lavador de Gases	Crook, 1990
Refrigeração Alimentação de caldeira Água de processo Construção pesada Lavagem de pisos e peças Irrigação de áreas verdes	Hespanhol, 1997
Refrigeração Alimentação de caldeira Água de processo Construção pesada	Beeckman, 1998
Refrigeração Alimentação de caldeira Água de processo Construção pesada	Mujeriego e Asano, 1999

FONTE: MIERZWA e HESPANHOL (2005)

Hespanhol (2003) cita que o reúso para fins industriais pode ser visualizado por diferentes aspectos, conforme as possibilidades existentes no contexto interno ou externo das indústrias. O autor classifica o reúso industrial nas seguintes modalidades: reúso macroexterno, macrointerno e reúso interno específico ou reciclagem. Mierzwa e Hespanhol (2005) em seu livro classificam o reúso industrial de forma mais simplificada sugerindo apenas as modalidades macroexterna e macrointerna, incorporando o reúso interno ou reciclagem dentro da modalidade macrointerna.

O reúso macroexterno é definido como o reúso de efluentes proveniente de estações de tratamento administradas por concessionárias municipais, estaduais ou ainda de outras indústrias. Para este caso a indústria deve estudar técnica e financeiramente a viabilização de um sistema de tratamento adicional, necessário para atender a novos padrões de qualidade, mais os de adução e distribuição do efluente. Geralmente, o sistema é viável se existir uma concentração razoável de indústrias que se associem ao programa de reúso, em um raio de aproximadamente cinco quilômetros no entorno da estação de tratamento e recuperação para reúso (MANCUSO e SANTOS, 2003).

O reúso específico consiste em efetuar a reciclagem de efluente de quaisquer processos industriais, nos próprios processos nos quais são gerados, ou em outros processos que se desenvolvem em sequência e que suportam qualidade compatível com o efluente em consideração (MANCUSO e SANTOS, 2003). A prática do reúso específico pode ser implantada de duas maneiras distintas (MIERZWA, 2002):

- Reúso em cascata: neste caso, o efluente originado por um determinado processo é diretamente utilizado em um processo subsequente, pois suas características são compatíveis com os padrões de qualidade da água utilizada. Este tipo de reúso é conhecido como reúso em cascata. Apesar desta modalidade de reúso parecer simples, em certos casos o efluente do processo anterior não atinge a qualidade do processo seguinte, sendo necessário utilizar os métodos de reúso parcial do efluente e da mistura do efluente com água de abastecimento público.
- Reúso de efluentes tratados: é o tipo de reúso mais discutido atualmente e consiste na utilização de efluentes já submetidos a um processo de tratamento. Neste caso a escolha do processo de tratamento em que o efluente será submetido, depende da qualidade exigida pelo local onde a água recuperada será utilizada.

São considerados exemplos típicos de reúso específico as operações de pintura em indústrias automobilísticas e de eletrodomésticos, onde as águas de lavagem que ocorrem sucessivamente, oriundas de decapagem, desengorduramento, fosfatização, etc., podem após tratamento serem recicladas no próprio processo de lavagem.

A US EPA (2004), no capítulo quarto do seu guia de reúso de água, sugere diretrizes para o reúso industrial em países e localidades que não possuem legislação definida. O Quadro 2.8 apresenta estes critérios, diretrizes e tratamento para a prática do reúso industrial.

QUADRO 2.8 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO INDUSTRIAL

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<i>Reúso Industrial</i> Resfriamento em única passagem (circuito aberto)	- Secundário; - Desinfecção.	- pH= 6-9; - ≤ 30mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{4, 5} ; - 1mg/l Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- 90 metros de áreas acessíveis ao público.	- O vapor/spray levado pelo vento não deve alcançar áreas acessíveis aos trabalhadores e ao público.
<i>Reúso Industrial</i> Recirculação em torres de resfriamento.	- Secundário; - Desinfecção (coagulação química e filtração podem ser necessárias).	- Variável, dependendo do número de recirculações pH= 6-9; - ≤ 30 mg/l DBO; - ≤ 30 mg/l SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 ml ^{4, 5} ; - 1 mg/l Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- 90 metros de áreas acessíveis ao público. Pode ser reduzido ou eliminado se for alcançado um alto grau de desinfecção.	- O vapor/spray levado pelo vento não deve alcançar áreas acessíveis aos trabalhadores e ao público; - Tratamento adicional é habitualmente empregado por usuários para prevenir incrustações, corrosão, atividade biológica, entupimento e espuma.
Outros usos industriais	Depende das especificações locais de cada usuário				

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁵ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100ml em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

2.4 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

O reaproveitamento ou a reciclagem de resíduos sólidos tem como objetivo a utilização completa de matérias-primas e a minimização do problema da poluição e do tratamento dos despejos (PAWLOWSKY, 1983 e 2010). O reaproveitamento de materiais do lixo municipal, por exemplo, não tem sido suficiente, pois a cada ano, milhares de toneladas de materiais potencialmente recicláveis têm sido enviadas para a incineração ou simplesmente jogadas em “lixões”, ou na melhor hipótese em aterros sanitários (PAVONI *et al.*, 1975; PERAZZO *et al.*, 2011).

O trato inadequado dos resíduos sólidos industriais contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, notadamente nos grandes centros urbanos, constituindo tarefa potencialmente poluidora do ar, solo e principalmente águas superficiais e do subsolo (OLIVEIRA e HOLANDA, 2004). A disposição de resíduos industriais, em aterros sanitários, a céu aberto ou jogados em lagos, rios e mares fazem com que ocorram não apenas prejuízos ao equilíbrio da natureza como também perdas econômicas pelo não reaproveitamento de materiais perfeitamente passíveis de novas utilizações. Dessa forma, a possibilidade do reaproveitamento de resíduos sólidos e subprodutos industriais como materiais de construção vêm sendo ultimamente estudada por vários pesquisadores (PRIM *et al.*, 1998; BORGIO, 2005; MENEZES *et al.*, 2007; SOLYON, 2009).

De acordo com PRIM *et al.* (1998), são três as razões que motivaram essa atenção: primeiro, uma preocupação com o esgotamento de reservas de matéria-prima que, se não para um país na sua totalidade, pelo menos para regiões específicas; segundo, a preocupação com a preservação do meio ambiente, afetada pelo volume crescente de resíduos sólidos descartados; e terceiro, em países carentes de matéria prima, a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pelo alto preço do petróleo, reciclando resíduos sólidos.

Para Teixeira e Bidone (1999), a reutilização se baseia no aproveitamento do material nas condições em que é descartado, sendo submetido a pouco ou nenhum tratamento, exigindo apenas pequenas operações. A reciclagem de resíduos sólidos se caracteriza pela técnica de refazer o ciclo, isto é, trazer os resíduos de volta ao sistema produtivo sob a forma de matéria-prima (TEIXEIRA e BIDONE, 1999; WIEMES, 2003).

Entretanto, para Pavoni *et al.* (1975), os materiais que podem ser reaproveitados dos resíduos sólidos podem ser classificados em dois grupos: (a) aqueles que podem ser diretamente reciclados e (b) outros que requerem um considerável processamento antes de serem reutilizados. Um exemplo de resíduos que podem ser diretamente reciclados são os rejeitos de produção. O segundo grupo pode ser exemplificado como os papéis que retornam para serem repolpados como aparas nas indústrias papeleiras.

O sucesso da reciclagem depende de algumas habilidades para: (a) reutilizar os resíduos, retornando ao processo original como substituto da matéria prima pura; (b) reutilizar os resíduos como matéria prima no processo interno ou fora dele; e (c) segregar os materiais recuperáveis dos não recuperáveis (CRITTENDEN e KOLACZKOWSKI, 1995; OLIVEIRA e HOLANDA, 2004). Porém, os mesmos autores ressaltam que a geração de resíduos e sua subsequente reciclagem podem levar a uma série de regulamentos e responsabilidades a serem cumpridas, além dos riscos a saúde e ao meio ambiente, se não forem bem estruturados.

Atualmente, existem diversas soluções para o reaproveitamento de resíduos, sem eles para resíduos industriais ou domésticos. Segundo Borgo (2005) e Solyon (2009), reaproveitar resíduos sólidos industriais para a confecção de produtos para a construção civil é uma opção que tem sido estudada por muitos pesquisadores no Brasil e no mundo.

Porém para tal é interessante que os novos materiais tenham propriedades mecânicas que se enquadrem nos padrões da legislação brasileira, como a resistência à compressão uniaxial relatadas na NBR 7170 (ABNT, 1983) e na 7171 (ABNT, 1992).

Outro fator de suma importância é verificar se os resíduos utilizados na fabricação de um novo material não contém compostos tóxicos ou perigosos. Como é o caso do alumínio, presente nos lodos provindos dos tratamentos físico-químicos dos efluentes. Nesses casos, onde há metais em sua composição, é interessante ainda realizar testes de solubilização e lixiviação.

Segundo alguns estudos na Inglaterra, Suécia e no mundo todo, a presença de alumínio na água que foi tratada com coagulantes, como o sulfato de alumínio, em seu tratamento físico-químico causa toxicidade. Além de poder provocar doenças de demência e coordenação motora, devido à deficiência renal em filtrar os metais do sangue que é levado ao cérebro. Dentre as doenças que o alumínio pode causar

estão o Alzheimer, mal de Parkinson e Síndrome de Down (SILVA, 1999; MERCÊ *et al.* 2008; MERCÊ *et al.*, 2010). Desta forma a busca por coagulantes alternativos, como os coagulantes orgânicos de origem vegetal à base de tanino, tem sido uma opção para diminuir os impactos causados pelo alumínio. Dentre as vantagens da utilização destes coagulantes orgânicos estão: uso de matéria-prima renovável, menor geração de quantidade de lodo, obtenção de lodo orgânico, eliminação de consumo de produtos alcalinizantes e auxiliares de coagulação e reduções dos custos globais do processo (PIANTÁ, 2008).

2.5 INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF

2.5.1 O processo de fabricação de painéis de MDF

Segundo a NBR 15316-2 (ABNT, 2006), os painéis de fibra de média densidade, conhecido por MDF (*Medium Density Fiberboard*), são chapas de fibra de madeira com teor de umidade abaixo de 20% e densidade maior ou igual a 450 kg/m³. Essas chapas são produzidas basicamente sob ação de calor e pressão, com a adição de adesivo sintético (BELINI, 2007). De acordo com Mori (2008), até pouco tempo, o bom e desejado móvel era aquele feito com madeira de lei. Os painéis de madeira reconstituída, feitos a partir de madeira desfibrada – MDF (*medium density fiberboard*) ou mesmo de resíduos de madeira – OSB (*oriented strand board*) substituíram, em muitos casos, as madeiras de lei. Esses materiais são tão bons ou melhores do que a madeira sólida, pois são móveis e materiais de construção mais estáveis, mais lisos, com o desenho e a textura desejável, bem como na densidade de painel que mais se apropriar ao uso. O MDF é estável, muito liso e uniforme, trabalha muito pouco, não empena e tem resistência muito boa.

Resumidamente, o processo de fabricação dos painéis de MDF ocorre conforme as etapas descritas a seguir (Figura 2.2):

- a) Descascamento: onde as cascas são retiradas das toras de madeiras;
- b) Fragmentação: após o descascamento, as toras passam por uma operação de fragmentação, onde são gerados cavacos, ou partículas, a partir de picadores;
- c) Classificação dos cavacos: os cavacos são separados por peneiras. Os maiores são separados, e em seguida, retornam ao picador. Os

menores são utilizados como combustível na caldeira;

- d) Armazenamento dos cavacos: são armazenados em silos onde, antes do processamento, passam por uma seleção por peneiras, seguidas de lavagem;
- e) Tratamento de cavacos: nesta etapa os cavacos são amolecidos para facilitar a operação do desfibrador na formação da polpa, reduzindo seu consumo energético;
- f) Desfibramento: nos desfibradores, os cavacos são introduzidos e, por força centrífuga, são lançados para a periferia dos discos;
- g) Mistura de resina: adicionada a resina, o catalisador, em alguns casos, certos aditivos, e mistura-se a matéria-prima.
- h) Secagem das fibras: o elevado teor das fibras acarreta uma série de problemas quando a manta é formada e prensada a quente;
- i) Entrelaçamento das fibras: colchão a seco formado a partir de uma suspensão das fibras ao ar. A altura do colchão é delimitada por um cilindro dentado a um tubo seccionador de fibra excedente;
- j) Seccionamento: o sistema muda conforme o tipo de linha de formação, que é o conjunto de equipamentos cujas operações dão a forma final ao MDF;
- k) Prensagem: a injeção do vapor durante a prensagem permite um aquecimento quase instantâneo da manta, resultando numa cura mais eficiente da resina, permitindo a manufatura das chapas de elevadas espessuras;
- l) Resfriamento: é efetuado para evitar variações dimensionais da chapa após o aquecimento. Normalmente, são resfriadas à temperatura ambiente, protegidas das intempéries;
- m) Corte e lixamento: o corte é feito procurando estabelecer as medidas dos painéis de MDF, conforme padrões estabelecidos. O lixamento está diretamente relacionado à preparação da superfície das chapas, para acabamentos finais.

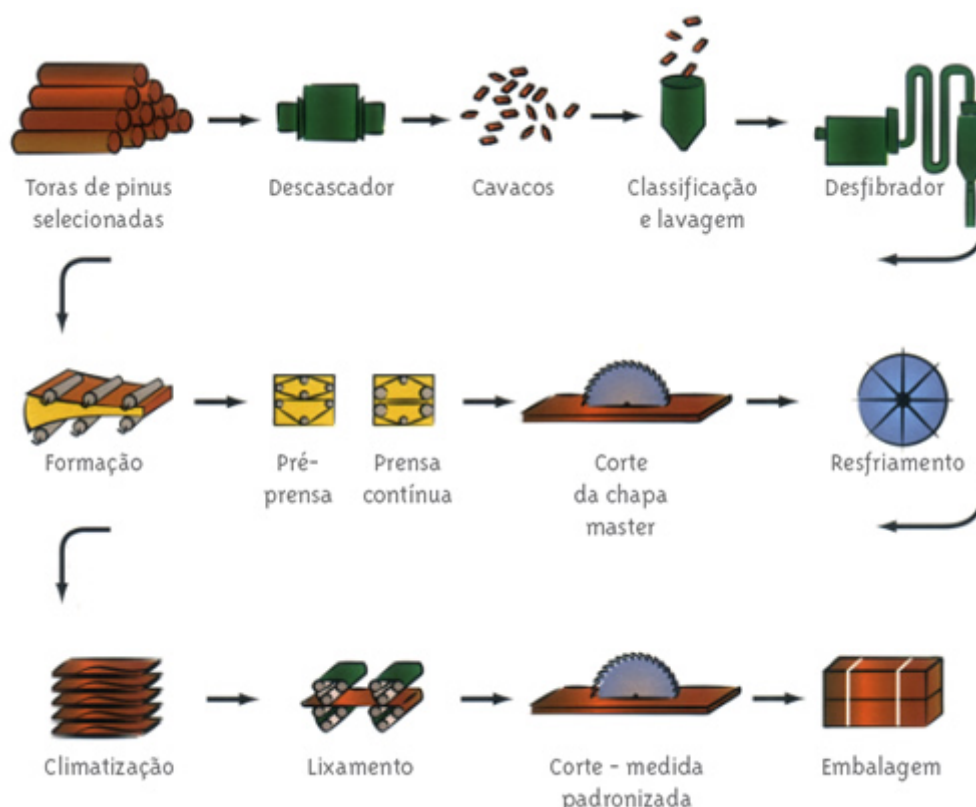


FIGURA 2.2 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAINÉIS DE MDF

FONTE: AECWeb (2011)

2.5.2 Geração de efluentes líquidos e resíduos sólidos

Dentre as etapas descritas, há geração de efluentes em três delas: no descascamento, na preparação e tratamento dos cavacos.

Na etapa de descascamento, as cascas são retiradas das toras em um equipamento chamado descascador, em formato de tambor giratório, onde a casca é removida através da fricção entre as toras e as paredes do tambor. O impacto ocasiona o rompimento das cascas das toras, as quais são desprendidas e arrastadas para fora mediante jatos d'água situados no interior do tambor (WASTOWSKI *et al.*, 2009). Por este motivo, o efluente gerado nesta etapa possui grande quantidade de material particulado (cascas de madeira) e pode apresentar grande quantidade de material orgânico (alta DQO – Demanda Química de Oxigênio).

Antes de entrar no picador, onde são transformadas em cavacos, as toras são lavadas a fim de retirar areia ou terra nelas contidas, visando diminuir o desgaste

das facas do picador. Além disso, a madeira úmida é mais facilmente cortada, diminuindo desta forma o consumo energético e o risco de quebra das facas (WASTOWSKI *et al.*, 2009).

O efluente gerado nesta etapa do processo contém grande quantidade de material particulado (areia, sujeira, pedregulhos, etc.). O tratamento dos cavacos é realizado para facilitar o desfibramento. Nesta etapa, os cavacos são colocados em tanques com agitadores contendo solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) aquecida. Segundo Torquato (2010), os tratamentos químicos, principalmente a quente, enfraquecem as ligações da lignina entre as fibras celulósicas e, conseqüentemente, as fibras são separadas mais facilmente e com menos danos. Por consequência, este efluente gerado possui pH próximo a 11 e alta carga de compostos orgânicos derivados da quebra da lignina.

Segundo a Huber Technology (2011), águas residuais com alta carga poluidora são geradas em locais diferentes durante o processo de fabricação de painéis de MDF. Estes efluentes apresentam concentrações muito elevadas de sólidos (cerca de 4000 mg/l) e DQO de mais de 15000 mg/l. A Gea Wiegand (2011) completa afirmando que, no processo de produção das fibras, as águas residuais são carregadas organicamente com ingredientes de madeira e produtos orgânicos como ácidos, sacarídeos, aldeídos e terpenos.

É interessante ressaltar que, devido ao fato da composição química das madeiras utilizadas para a produção de painéis de MDF não serem constantes e estarem diretamente ligadas às mudanças na composição do solo, ao clima e a outros fatores externos, definir as características físico-químicas do efluente gerado é de grande dificuldade, pois cada período de processamento gera efluentes com composições distintas.

2.5.3 Tratamento físico-químico do efluente industrial por coagulação/floculação

Um dos métodos de tratamento de efluentes industriais é o físico-químico, o qual pode ser empregado como um método auxiliar ao tratamento biológico, visto que o mesmo não possui boa eficiência quando empregado isoladamente (VON SPERLING, 2005). Algumas etapas do tratamento físico-químico de coagulação/sedimentação consistem de:

- a) Correção do pH: se deve a função da coagulação ocorrer somente em valor de pH ótimo, quando ocorre a formação dos flocos. É necessário fazer ensaios de jarros para determinar este valor, pois o mesmo varia de acordo com a origem, a concentração e o tipo de efluente.
- b) Coagulação: a mistura do coagulante e do efluente provoca a hidrólise, polimerização e a reação com a alcalinidade, formando hidróxidos denominados gel, produzindo, na solução, íons positivos. Estes íons desestabilizam as cargas negativas dos colóides e sólidos em suspensão, reduzindo o potencial zeta a ponto próximo de zero, denominado ponto isoelétrico, permitindo a aglomeração das partículas e, conseqüentemente, a formação de flocos (NUNES, 2004). O processo de coagulação tem como principal objetivo neutralizar as cargas elétricas das partículas em suspensão, normalmente negativas, por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas, como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros, neutralizando assim suas cargas superficiais e proporcionando a formação de flocos densos em condição de decantar (NALCO, 1988; SANTOS FILHO, 1976).
- c) Floculação: pode-se melhorar a eficiência de qualquer tipo de decantador pela floculação dos sólidos em suspensão. Emprega-se esta técnica especialmente nos processos de tratamentos químicos, imprimindo ao efluente, ao qual se adicionou o coagulante, um movimento lento, numa câmara de floculação, a fim de que se formem grandes flocos antes de encaminhá-los ao decantador. As câmaras de floculação podem ser empregadas também sem adição de coagulantes, como tratamento preliminar, nas quais os efluentes tenham eventualmente tendência a formar flocos (IMHOFF, 1996).
- d) Flotação ou Sedimentação: Ele pode ser definido como um conjunto de técnicas empregadas em estações de tratamento de água e esgoto, para a separação físico-química de materiais. A flotação pode ocorrer de três maneiras distintas: mecânica, por insuflação de ar ou por ar dissolvido (NALCO, 1988).

Realiza-se o processo de coagulação e floculação para separar sólidos em

suspensão, sempre que a taxa de subsidência for muito baixa para promover uma clarificação efetiva da água (NALCO, 1988). Esse é o caso das partículas em suspensão fina, em estado coloidal ou em solução, as quais permanecem em suspensão pelo fato de terem cargas elétricas em suas superfícies, já que a força de repulsão criada entre cargas de mesmo sinal impede a aproximação, colisão e formação de flocos.

Geralmente as partículas coloidais presentes na água apresentam os maiores problemas quando se visa a remoção de cor e turbidez. Isso se deve às propriedades eletrocinéticas dos colóides e também às características consequentes da dimensão reduzida das partículas (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979; SANTOS *et al.*, 2007).

Em termos práticos, o que realmente interessa no processo de coagulação e floculação é a dosagem e a condição ótima para a aplicação do coagulante, etapa de grande importância no tratamento, uma vez que as etapas subsequentes dependem desta. Isso porque as reações químicas envolvidas são muitas rápidas e dependem da energia de agitação, da dose do coagulante do pH e da alcalinidade da água. Casos essas condições estejam corretas, as reações ocorrem num espaço de tempo bastante reduzido (AZEVEDO NETTO, 1987; AMIRTHARAJA e O'MELIA, 1990), exigindo assim o desenvolvimento de ensaios específicos Jar-test.

Os dados obtidos no ensaio de coagulação são aplicados para condições reais, o que pode ser feito em dispositivos próprios, como misturadores mecânicos, misturadores hidráulicos ou difusores.

2.5.3.1. Coagulação

O processo de coagulação tem como principal objetivo neutralizar as cargas elétricas das partículas em suspensão, por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas, como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros (NALCO, 1988, SANTOS *et al.*, 2007).

Para se ter uma boa coagulação, deve-se efetuar o experimento em pH adequado, que é chamado de pH ótimo, ao qual este fenômeno ocorre no menor espaço de tempo e com uma dosagem de coagulante relativamente pequena. Produtos químicos como cal hidratada, carbonato de cálcio, carbonato de sódio, hidróxido de sódio, gás carbônico, ácido clorídrico e ácido sulfúrico são empregados

para o ajuste do pH.

A alcalinidade também possui importância indiscutível no tratamento químico de água e efluentes. Quando a água não possui alcalinidade ideal para coagulação costuma-se adicionar álcalis como a cal virgem (CaO), cal hidratada (Ca(OH)_2) e barrila (Na_2CO_3) para promovê-la e mantê-la nos níveis ideais (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979; FILHO e DI BERNARDO, 2003).

Existem vários tipos de coagulantes disponíveis no mercado, porém os mais conhecidos e utilizados estão divididos em quatro grandes categorias: cal; sais de alumínio, tal como sulfato de alumínio, aluminato de sódio, cloreto de alumínio; sais de ferro como sulfato férrico, cloreto férrico e sulfato ferroso e polímeros (RICHTER, 2009).

O hidróxido de cálcio (cal) é utilizado como coagulante, apesar de ele não ser considerado um coagulante verdadeiro. Este pode reagir com a alcalinidade do bicarbonato e precipitar o carbonato de cálcio e com orto-fosfato para precipitar hidroxiapatita de cálcio (ECKENFELDER, 1989; SANTOS *et al.*, 2007), além de reduzir sólidos suspensos, a turbidez, a concentração de metais pesados e a população de vírus e bactérias. O efluente tratado com cal apresenta alto pH, mas este pode ser diminuído por recarbonatação ou por adição de ácido. As dosagens requeridas dependem basicamente da dureza e da alcalinidade da água, sendo normais doses variando entre 200 e 400 mg/l, em pH em torno de 11,0 (MANCUSO e SANTOS, 2003).

O sal de alumínio normalmente utilizado é o sulfato de alumínio, que além de possuir baixo custo, é de fácil transporte e manejo e grande disponibilidade. A dosagem necessária de sulfato de alumínio para remoção de fósforo, por exemplo, é maior que a estequiometricamente requerida, em razão da reação com a alcalinidade (MANCUSO e SANTOS, 2003). Este produto tem reação ácida, consumindo a alcalinidade natural da água, sendo que cada ppm adicionado reduz o pH da água numa proporção de 0,45 (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979).

Os sais de ferro, principalmente o cloreto férrico, são bastante eficientes na remoção de sólidos suspensos e fósforo do efluente. Estes sais normalmente são dosados conjuntamente com a cal ou hidróxido de sódio, que ajudam na produção dos flocos e aumentam o pH da água. O cloreto férrico produz bons flocos em amplo intervalo de pH e sua dosagem para permitir a precipitação de hidróxidos é cerca de 10 mg/l (MANCUSO, 2000). O sulfato ferroso é muito útil para tratar águas que

apresentam pH elevado, enquanto que o sulfato férrico é conveniente para o tratamento de águas altamente coloridas ou ácidas (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979, ABDESSEMED e NEZZAL, 2003).

Em geral, aumentando-se gradualmente a concentração dos coagulantes, nota-se um incremento na velocidade de formação de flocos, mas o aumento excessivo pode produzir a inversão do Potencial Zeta, inferindo de maneira contrária ao que se observa inicialmente (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979; FILHO e DI BERNARDO, 2003).

O Quadro 2.9 apresenta algumas características de alguns tipos de coagulantes utilizados no tratamento de água e efluentes.

QUADRO 2.9 – PRODUTOS QUÍMICOS INORGÂNICOS MAIS USADOS PARA COAGULAÇÃO EM PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

Substância Química	Fórmula	Forma Disponível	pH	pH de atuação
Sulfato de alumínio	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Líquido e massa sólida	3,5	5,5 a 7,0
Cloreto de alumínio	AlCl_3	Líquido	(1)	(1)
Hidróxido de cálcio (cal)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Pó e pasta	(1)	(1)
Cloreto férrico	FeCl_3	Líquido e massa sólida	3 a 4	8,0 a 9,4
Sulfato férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Granular	3 a 4	8,0 a 9,4
Sulfato ferroso	$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Granular	(1)	8,5 a 11
Aluminato de sódio	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$	Floco	11 a 12	5,5 a 7,0

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003), DEGANI (1981) e AZEVEDO NETTO *et al.*, (1979)
(1) Não informado

Quando a água ou efluente apresentarem um Potencial Zeta muito negativo, ou não possuírem partículas que sirvam como núcleos de flocos (baixa turbidez) torna-se necessário o uso de auxiliares de coagulação.

Estes produtos têm a finalidade ajudar e acelerar o processo de formação de flocos volumosos e de rápida sedimentação. Substâncias como sílica ativa, carbonato de cálcio, bentonita, gás carbônico, polímeros e flocos pré-formados (retorno de lodo fresco) são usados com este objetivo. Os polímeros terão atenção especial na seção 2.5.3.2.

2.5.3.2 Polímeros

Os polímeros, neste caso, utilizados como auxiliares de coagulação, são os polieletrólitos. Estes podem ser divididos em duas categorias: naturais e sintéticos. Importantes polieletrólitos naturais incluem polímeros de origem biológica e aqueles derivados de amido tais como derivados da celulose e alginatos. Os polieletrólitos sintéticos são polímeros de cadeia longa e alto peso molecular (METCALF & EDDY, 2003) que, quando lançados em água, podem apresentar um número de cargas muito grande, distribuído ao longo da cadeia (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979; ABDESSEMED e NEZZAL, 2003).

Os polieletrólitos também podem ser classificados pela sua carga. Quando positiva o polieletrólito é chamado de catiônico. Quando negativa, aniônico e quando não possui carga, não iônico (METCALF & EDDY, 2003; ECKENFELDER, 1989; AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979).

A ação dos polieletrólitos pode ser dividida em três categorias gerais (METCALF & EDDY, 2003):

- Neutralização de cargas (uso do polieletrólito catiônico);
- Formação de ponte de polímero (uso dos polieletrólitos aniônico e não iônico);
- Neutralização de cargas e formação de ponte de polímero (uso de polieletrólito catiônico com altíssimo peso molecular).

Os polieletrólitos catiônicos podem ser usados sem a aplicação do coagulante primário (para os tipos de água mais comuns) o que não poderá ser feito quando se tratar de aniônicos e não iônicos. Os catiônicos podem baixar o Potencial Zeta a valores bastante reduzidos e ainda promover a floculação (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979; ABDESSEMED e NEZZAL, 2003).

Segundo METCALF & EDDY (2003), para se ter neutralização adequada das cargas negativas, o polieletrólito catiônico deve ser adsorvido pela partícula, o que acontecerá somente se a intensidade da mistura for suficiente para que os polímeros sejam adsorvidos pelas partículas coloidais.

Os polieletrólitos aniônicos e não iônicos, apresentam grande poder de floculação, mas não gozam das características favoráveis de carga dos catiônicos (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979).

Estes polieletrólitos, segundo Metcalf & Eddy (2003), são bons floculadores,

pois são capazes de formar pontes de polímeros. A ponte ocorre através da adsorção do polieletrólito na partícula por mistura rápida. A partícula já com a ponte de polímero se emaranha com outras partículas durante o processo de floculação até atingir tamanho e peso suficientes para remoção por sedimentação. Quando utilizados polieletrólitos catiônicos de elevado peso molecular também é possível promover a formação de pontes de polímeros pela redução das cargas superficiais da partícula (METCALF & EDDY, 2003).

No Quadro 2.10 é possível visualizar um processo inicial de escolha de um coagulante e um auxiliar de coagulação baseado em água bruta com níveis variados de turbidez e alcalinidade. Água que possui alta turbidez com alta alcalinidade possui fácil tratamento, possuindo facilidade na formação do floco. Água com alta turbidez e baixa alcalinidade, pode ter sua alcalinidade aumentada adicionando cal e assim otimizando a coagulação. Já a água com baixa turbidez e alcalinidade é de difícil tratamento, necessitando de correção da alcalinidade com cal e altas doses de polieletrólitos com alto peso molecular (KIELY, 1996; ABDESSEMED e NEZZAL, 2003).

O uso de polieletrólitos, mesmo que em pequenas dosagens, traz grandes vantagens técnicas, tais como: (1) a redução significativa do consumo de coagulantes, (2) a melhoria na sedimentação e filtração, (3) redução no volume do lodo nos decantadores, (4) redução no tempo da sedimentação, (5) a não interferência no pH, reduzindo ou mesmo eliminando a necessidade de compostos alcalinos e (6) a não contribuição no aumento de sólidos totais dissolvidos, como ocorre com coagulantes tradicionais (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979).

A escolha do tipo e da dosagem dos polieletrólitos, via de regra, é feita por tentativa, apoiado por ensaios de laboratório. As dosagens típicas situam-se na faixa de 0,10 a 0,25 mg/l, em solução de 0,2 a 2,0% (MANCUSO e SANTOS, 2003).

Segundo KIELY (1996) a dose de polieletrólito pode variar ainda mais, ficando numa faixa entre 0,05 e 0,5 mg/l. Como os polieletrólitos são muito caros, a dose ótima a ser aplicada em conjunto com o coagulante deve ser determinada através do uso do teste de jarros (*Jar test*).

QUADRO 2.10 – COAGULANTES E POLIELETRÓLITOS USADOS PARA O TRATAMENTO DE TURBIDEZ DA ÁGUA

Classe da água	Descrição da água	Sulfato de alumínio	Cloreto férrico	Polieletrólito
A	Alta turbidez > 5 NTU Alta alcalinidade > 250 mg/l HCO_3 (Fácil de tratar)	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7	Não necessário
B	Alta turbidez Baixa alcalinidade < 50 mg/l HCO_3	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7 + Cal	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7 + Cal	Não necessário
C	Baixa turbidez Alta alcalinidade	Auxílio de polieletrólito é essencial	Auxílio de polieletrólito é essencial	Essencial
D	Baixa turbidez < 1 NTU Baixa alcalinidade < 50 mg/l HCO_3 (Difícil de tratar)	Possível apenas com cal e polieletrólito	Possível apenas com cal e polieletrólito	Essencial

FONTE: KIELY (1996)

2.5.3.3 Mistura e Floculação

A mistura visa conduzir os constituintes, neste caso os coagulantes e seus auxiliares, em câmaras de mistura rápida, a um estado de uniformidade desejada promovendo uma coagulação homogeneia. Esta mistura intensa é que assegura uma distribuição uniforme do coagulante na água, colocando-o em contato com as partículas existentes em suspensão, antes que a reação esteja terminada (LEME, 1979). A inexistência dessa mistura intensa e adequada implica em que parte da água seja supertratada, enquanto que outras partes sejam insuficientemente tratadas, prejudicando o tratamento.

No campo de tratamento de efluentes, dois tipos de mistura possuem maior destaque e importância, sendo elas a mistura rápida contínua e a mistura contínua. A mistura rápida contínua em tratamento de efluentes tem a função de misturar uma substância com outra e tem sua principal aplicação em (1) combinar produtos químicos com efluentes (ex.: promover floculação e desinfecção), (2) combinar líquidos miscíveis e (3) a adição de produtos químicos em lodo e biossólidos para melhorar suas características de desidratação. A mistura contínua é usada onde o conteúdo de reatores ou tanques de espera deva permanecer em suspensão tais como lagoas de equalização, tanques de floculação, tanques de lodos ativados, lagoas aeradas e digestores aeróbios. Neste capítulo iremos tratar apenas da aplicação em floculação (METCALF & EDDY, 2003).

A dispersão uniforme dos reagentes químicos na água, deve ser feita o mais rapidamente possível, com gradiente de velocidade $G \geq 600s^{-1}$. Esta pode ser feita em câmaras com rotores mecânicos, ressalto hidráulico agitado; com velocidade acima de 2 m/s e perda de carga superior a 0,25 m. O percurso em entre misturadores rápidos e floculadores deverá ser o menor possível. Os tempos de detenção na unidades de mistura rápida é de aproximadamente 1 a 10 s (AZEVEDO NETTO, 1987).

Assim, após a coagulação, a água com partículas desestabilizadas é submetida ao processo de floculação. O processo de floculação promove o contato entre as partículas desestabilizadas, de modo que a colisão entre as partículas sólidas possibilita uma agregação em forma de flocos maiores e mais pesados, que são posteriormente removidos por processos de sedimentação. O fenômeno da floculação é o processo pelo quais as partículas em estado de equilíbrio eletrostaticamente instável no seio da massa líquida são forçadas a se movimentar, a fim de que sejam atraídas entre si formado flocos, que, com a continuidade da agitação, tendem a aderir uns aos outros, tornado-se pesados, para posterior separação nas unidades de decantação e filtração (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979).

Embora não usado de forma rotineira, a floculação em efluentes por agitação mecânica ou por ar pode ser usada para (METCALF & EDDY, 2003):

- Aumentar a remoção de sólidos suspensos e DBO em decantadores primários;
- Condicionamento de efluentes contendo certos resíduos industriais;
- Aumentar a performance dos decantadores secundários de processos de lodos ativados, e;
- Como um pré-tratamento do efluente a ser filtrado posteriormente.

De forma um pouco mais aprofundada, pode-se dizer que existem dois tipos de floculação: a microfloculação e a macrofloculação. A distinção entre estes dois tipos de floculação está baseada no tamanho das partículas envolvidas.

A microfloculação, também conhecida como floculação pericinética, é o termo usado para referir-se a agregação de partículas provocada pelo Movimento Browniano das moléculas. Sua faixa de atuação é significativa para partículas com tamanho entre 0,001 e 1 μm . Na macrofloculação, ou floculação ortocinética, a faixa de atuação é para partículas acima de 1 ou 2 μm . A macrofloculação pode ser provocada por (1) gradiente de velocidade induzido e (2) diferencial de

sedimentação (METCALF & EDDY, 2003). Fazendo mistura com rotor mecânico em reatores ou câmaras de mistura, é possível obter circulação e cisalhamento do fluido. A força atribuída por unidade de volume pode ser usada como estimativa da efetividade da mistura, baseado no raciocínio de que mais força aplicada cria mais turbulência, e mais turbulência resulta em melhor mistura. CAMP e STEIN (1946, citado por: METCALF & EDDY, 2003) estudaram a fundamentação e o efeito do gradiente de velocidade em vários tipos de tanques de coagulação e desenvolveram a Equação 2.1 para ser usada em projeto e operação de sistemas que utilizam dispositivo por mistura mecânica.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (2.1)$$

Em que:

G= Gradiente de velocidade média (T^{-1} , 1/s)

P= Potência necessária (W)

μ = Viscosidade dinâmica (N.s/m²)

V= Volume do floculador (m³)

Valores típicos para Gradiente de velocidade média (G) usados em várias operações de mistura são apresentados no Quadro 2.11.

QUADRO 2.11 – VALORES TÍPICOS DE TEMPO DE DETENÇÃO E GRADIENTE G PARA MISTURA E FLOCULAÇÃO EM EFLUENTES

Processo	Faixa de Valores	
	Tempo de detenção	Valores G (s ⁻¹)
Mistura		
Operações típicas de mistura rápida em tratamento de efluentes.	5 – 30 seg	500 – 1500
Mistura rápida para efetivo contato inicial e dispersão de produtos químicos.	< 1 seg	1500 – 6000
Mistura rápida de produtos químicos para processos de filtração por contato.	< 1 seg	2500 – 7500
Floculação		
Processo típico de floculação usado em tratamento de efluentes.	30 – 60 min	50 – 100
Floculação em processos de filtração direta	2 – 10 min	25 – 150
Floculação em processos de filtração por contato.	2 – 5 min	25 – 250

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

2.5.3.4 Sedimentação

O processo de sedimentação ou decantação é a etapa subsequente, e tem por objetivo separar da água os flocos formados na etapa de floculação. Esta separação é resultado da ação da gravidade e inércia sobre os flocos e a água (KIANG e METRY, 1982).

Os objetivos e aplicações da sedimentação é a retirada de partículas finas como areia, SST, e flocos formados por coagulação química de materiais e organismos de difícil sedimentação. A sedimentação também é usada para criar um lodo mais concentrado de sólidos com possibilidade de ser manuseado e tratado mais facilmente (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979; METCALF & EDDY, 2003).

Segundo as características das partículas a serem removidas, o processo de sedimentação pode ser classificado em quatro tipos (GREGORY e ZABEL, 1990):

- Tipo 1: sedimentação de partículas discretas, pouco concentradas na água, em que a floculação e a ação entre as partículas são desprezíveis;
- Tipo 2: sedimentação de partículas em baixa concentração ou floculenta, na qual as partículas continuam a agregar à medida que o processo de sedimentação ocorre, fazendo com que a velocidade de sedimentação também aumente;
- Tipo 3: sedimentação obstruída ou por zona, na qual a concentração de partículas é grande, o que favorece os efeitos de interação e a formação de uma interface bem definida entre o líquido clarificado e os sólidos que sedimentam;
- Tipo 4: sedimentação por compressão, na qual a concentração de partículas é grande, ocorrendo a sedimentação por camadas.

Do ponto de vista do tratamento de água para o abastecimento industrial, o tipo de sedimentação que prevalece é o 2, pois a concentração de partículas que interagem à medida que sedimentam é baixa. Os sólidos formados no processo de floculação separam-se quando a água é mantida por um período de tempo suficientemente adequado (tempo de detenção hidráulico) em um dispositivo denominado sedimentador ou decantador.

Os sedimentadores podem ser retangulares ou circulares e ter dispositivos de alimentação, coleta de água decantada e acúmulo e descarga de lodo. Esses

equipamentos devem ser projetados de forma a evitar a quebra dos flocos e correntes preferenciais – que poderiam conduzir ao arraste de partículas para a água efluente do sedimentador e, assim, reduzir a eficiência do procedimento (GREGORY e ZABEL, 1990). Uma alternativa aos sedimentadores convencionais, que são grandes tanques, é o decantador de alta taxa, que tem placas ou tubos inclinados em seu interior. Ele possibilita um tempo de detenção hidráulico de até quinze minutos, obtendo-se uma eficiência de remoção de sólidos equivalente a um decantador retangular convencional que opera com um tempo de detenção de aproximadamente duas horas (YAO, 1973).

2.5.3.5 Flotação

Uma alternativa ao processo de sedimentação, para separar os flocos formados pela coagulação e floculação, é a flotação. A flotação consiste em pressurizar uma fração clarificada do efluente e dissolver parte do oxigênio no líquido. Posteriormente, o efluente pressurizado é liberado no interior de um dispositivo adequado e, formam-se pequenas bolhas de ar, devido à expansão do oxigênio, que aderem às partículas e as fazem flutuar. Na superfície do dispositivo há um sistema que remove o material sólido flotado, e o líquido sai pelo fundo do equipamento. Esse dispositivo separador de sólidos é conhecido como flotador (RICHTER, 2009).

O desempenho do processo de flotação envolve cinco etapas:

- 1ª etapa – retenção de resíduos sólidos, através de sistemas de grades basculantes e cercas flutuantes. Em regiões onde se verificam problemas de assoreamento dos cursos d'água são utilizadas também caixas de areia;
- 2ª etapa – aplicação de agentes químicos coagulantes, entre os quais o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, que agregam a sujeira e também promovem uma filtração química da água em tratamento, em processo similar ao utilizado na limpeza de piscinas;
- 3ª etapa – microaeração, através da injeção de água e ar por equipamentos específicos, permitindo a flotação ou elevação dos flocos acima da superfície da água e facilitando sua remoção;
- 4ª etapa – remoção da sujeira através de um sistema rotativo, que viabiliza a coleta do material flotado. Em estações de tratamento de água e esgoto, o

lodo resultante do processo é destinado para as estações de tratamento de esgoto, incinerado ou aproveitado como adubo, quando a qualidade indicada pelas análises permitem;

- 5ª etapa – desinfecção do efluente, através da aplicação de produtos próprios, como o cloro. Este procedimento é eventual pois depende do uso que será dado a água.

As operações de flotação dividem-se em três tipos básicos: mecânica, por insuflação de ar e por ar dissolvido. A flotação mecânica consiste na dispersão mecânica de bolhas de ar de 0,1 a 1 mm de diâmetro e é, sobretudo, usada para a separação e concentração de minérios. A flotação por insuflação de ar consiste em uma flotação natural, melhorada pela insuflação simples no seio da massa líquida, de bolhas de ar de alguns milímetros de diâmetro. Nos sistemas destinados à eliminação de matérias leves (graxas, óleos viscosos, fibras grandes, etc.) prevê-se, geralmente, duas zonas: uma de recirculação e emulsificação e outra mais calma, de flotação propriamente dita.

No sistema de flotação por ar dissolvido (FAD) as partículas sólidas são removidas da água e flotam, reduzindo sua densidade pela adesão de pequenas bolhas de ar. Nesse processo, as bolhas de ar são geradas pela súbita redução de pressão na corrente líquida saturada de ar, proveniente da câmara ou tanque de saturação. Por meio de uma bomba, uma pequena quantidade de água clarificada (5% a 10% de vazão que passa pela unidade), é levada à pressão de 4-5,5 atm e conduzida ao tanque de saturação, onde se torna saturada de ar, alimentada por um compressor. Esta água que é recirculada ao sistema vê sua pressão diminuída bruscamente, liberando uma grande quantidade de micro bolhas de ar, que aderem aos flocos já formados, fazendo flutuar (RICHTER, 2009).

Os flocos sobem e se acumulam na superfície do tanque, formando uma capa de lodo de espessura crescente, removida periodicamente, mediante raspadores superficiais. Os flocos de sulfato de alumínio tem normalmente densidade de 1,003 e tamanho ao redor de 1mm. Com o ar incorporado pelo processo descrito anteriormente, a densidade reduz a 0,98 - 0,99 ou menos, com o que se obtém velocidades de flotação 10 ou mais vezes superiores às velocidades de decantação de flocos formados nas mesmas condições (RICHTER, 2009). Os principais parâmetros dos sistemas de tratamento por flotação por ar dissolvido encontram-se no Quadro 2.12.

QUADRO 2.12 – PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SISTEMAS DE FAD

Parâmetro	América Latina
Tempo de Flotação (min)	10 – 25
Taxa de escoamento superficial (m ³ /m ² .d)	96 – 32
Taxa de recirculação (%)	5 – 12
Pressão de saturação (bar)	4 – 8

FONTE: Adaptado de RICHTER (2009)

Mesmo depois da passagem pelo decantador ou flotor, ainda há na água partículas em suspensão que não puderam ser removidas, porque sedimentam ou flutam em baixa velocidade. Deve-se adotar um processo complementar de separação, normalmente a filtração (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Cabe ressaltar que após a remoção dos sólidos, seja por sedimentação ou flotação, a água deve ainda passar por uma desinfecção, uma vez que muitos dos organismos nela presentes podem prejudicar os processos nos quais participará ou prejudicar a saúde dos seres humanos, caso venha a ser ingerida (DREW, 1979; HAAS, 1990). O processo de desinfecção de grandes vazões de água pode ser economicamente realizado com produtos químicos e de radiação ultravioleta, com destaque aos seguintes agentes de desinfecção: compostos de cloro, ozônio e radiação ultravioleta. Cada agente tem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

2.5.4 Disposição do resíduo

A necessidade de minimizar o consumo de água potável e o descarte de efluentes tem ganhado espaço dentro da indústria uma vez que tais medidas proporcionam ganhos tanto ambientais como econômicos. A proibição da queima do lodo de estações de tratamento físico-químico de efluentes em caldeiras especificada pelo Artigo 3 da Resolução SEMA 42, de 22 de julho de 2008 (IAP, 2011), também impulsiona as indústrias a buscar novas formas de disposição e até mesmo reaproveitamento do resíduo gerado. Adicionar a este resíduo um valor agregado que proporcione a formação de um produto comercial é vantajoso, pois diminui possíveis gastos com a disposição do mesmo e implica no ganho econômico pela sua venda a outros setores.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A abordagem deste trabalho esteve voltada ao pós-tratamento da água residuária visando alcançar os parâmetros de qualidade para o seu reúso e ao aproveitamento do lodo físico-químico a fim de gerar um produto com valor agregado e comercial. A proposta de minimização de resíduos não se refere ao processo ou geração, mas sim no lançamento dos resíduos industriais gerados, a fim de diminuir sua disposição e diminuir a demanda de água potável utilizada para determinadas atividades na unidade fabril.

A metodologia adotada neste estudo foi dividida em duas etapas principais, a saber:

- i. Tratamento físico-químico do efluente final da ETE por coagulação/floculação seguido de sedimentação e flotação;
- ii. reaproveitamento de resíduos físico-químicos e das cinzas para confecção de um produto com características adequadas para construção civil e estudos dos processos de interação entre os componentes utilizados no novo material desenvolvido.

A seguir, a descrição dos métodos e técnicas utilizados no desenvolvimento deste estudo.

3.1 INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF

A indústria está localizada na região de Araucária (Paraná, Brasil) e apresenta uma produção de 30.000 m³/mês de painéis de MDF. Ela também comercializa painéis do tipo MDP e outros produtos de madeira. Seu volume de geração de efluentes é de 600 m³/dia.

A indústria tem 3 tipos de consumo de água:

- Água Sanepar: Consumo médio 13,4 m³/dia (uso na área administrativa);
- Água de Poços Artesianos: Consumo médio de 128 m³/dia (uso em bebedouros e sanitários e no processo produtivo de MDP);
- Água Sanepar Industrial: Consumo médio de 1.064 m³/dia (Uso de

95m³/dia na fábrica da Serraria e 969m³/dia no processo do MDF - caldeira e processo)

Seu processo produtivo da fabricação de painéis de MDF pode ser representado pelas Figuras 3.1 e 3.2.

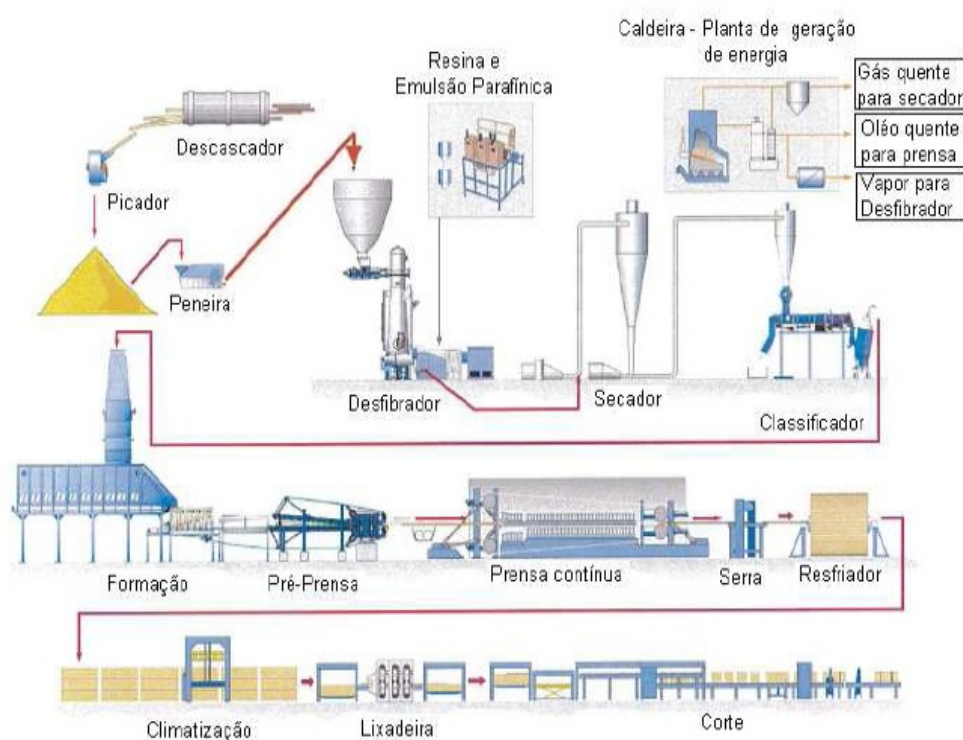


FIGURA 3.1 – PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF

FONTE: RIBEIRO (2011)

O tratamento dos efluentes desta indústria possui as seguintes etapas: peneiramento, resfriamento, homogeneização, tratamento físico-químico, equalização (efluente físico-químico e efluente sanitário), tratamento biológico (lodos ativados), decantação e desidratação de lodo. A Figura 3.3 demonstra o fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

O efluente bruto do processo é enviado para a ETE e primeiramente passa por uma peneira rotativa para retirada dos sólidos maiores. O efluente é bombeado para o poço de bombeamento, em seguida para a torre de resfriamento e então é encaminhado para o Decantador primário. Após decantar, o efluente segue para o tanque de homogeneização.

O efluente é bombeado para o Decantador secundário, onde ocorre o tratamento físico-químico. São adicionados Hidróxido de Cálcio, para o ajuste do pH, o Policloreto de Alumínio, para a coagulação, e o Polímero Aniônico, para promover a floculação.

Após o pré-tratamento o efluente segue para o tanque de equalização, onde ocorre também o lançamento do esgoto sanitário do restante da fábrica.

Do tanque de equalização o efluente segue para os tanques de aeração. Nestes tanques ocorre o tratamento biológico através de bactérias aeróbicas e injeção de ar.

A próxima etapa é constituída do Decantador terciário, que possui um formato cônico, com o objetivo de sedimentar o lodo. Na parte superior fica o efluente tratado e na parte inferior o lodo. O lodo é bombeado para a centrífuga onde o excesso de umidade é retirado. O lodo pode ainda retornar para o tanque de aeração, quando necessário (lodo ativado).

O efluente final sai do tanque de decantação e segue para o poço de recalque e em seguida é lançado no corpo receptor.

O fluxograma do processo da ETE está representado pela Figura 3.3.

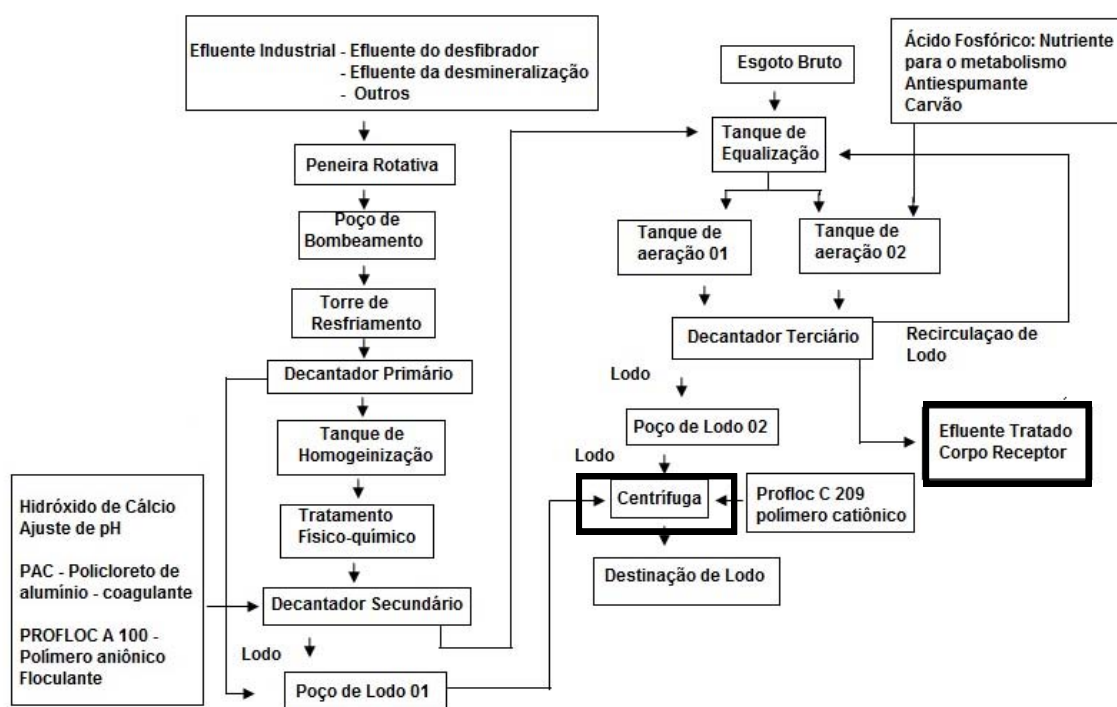


FIGURA 3.3 – ETAPAS DO PROCESSO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MDF

FONTE: RIBEIRO (2011)

3.1.1 Coleta das amostras

Foram realizadas cinco coletas de água residuária e apenas uma para o lodo físico-químico e cinzas no decorrer de maio a dezembro de 2011. A água residuária foi coletada ao final de todo o processo de tratamento da ETE. A cinza foi coletada na caldeira onde a madeira é queimada e o lodo foi coletado na centrífuga proveniente dos decantadores primário e físico-químico (secundário). Na Figura 3.3 estão destacados os dois pontos de coleta na ETE da indústria.

Imediatamente após as coletas, as amostras da água residuária foram acondicionadas em refrigerador, sob temperatura de $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, afim de não alterar suas características físico-químicas e biológicas. Enquanto a amostra de lodo físico-químico e cinzas foram armazenadas em locais cobertos para proteger da umidade e manter suas características originais.

3.2 MINIMIZAÇÃO NO LANÇAMENTO DE RESÍDUOS

3.2.1 Caracterização da água residuária

A fim de reduzir o consumo de água e o descarte do efluente tratado de uma indústria de painéis de MDF foi proposta uma tecnologia de pós-tratamento que possibilite a reutilização da sua água residuária dentro da unidade fabril.

Primeiramente, a água residuária foi caracterizada, em triplicata, quanto cor, turbidez, potencial hidrogeniônico (pH), temperatura, demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), demanda química de oxigênio (DQO), conjunto de sólidos suspensos (CSS), conjunto de sólidos totais (CST), e qualidade microbiológica (coliformes totais e coliformes termotolerantes).

Os procedimentos biológicos de contagem de coliformes totais e termotolerantes foram realizados pela técnica de cartela com a utilização do substrato cromogênico (Colilert[®]), segundo descrito por Higaskino *et al.* (2000) e Melo *et al.* (2001).

As análises físico-químicas e biológicas foram realizadas no Laboratório de Engenharia Ambiental Prof. Francisco Borsari Netto (LABEAM), do Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no Campus Centro Politécnico. Os procedimentos físico-químicos foram realizados de acordo com a metodologia especificada pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

O Quadro 3.1 e o Quadro 3.2 apresentam informações sobre os métodos de análise para os parâmetros em estudo.

QUADRO 3.1 – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA AS ANÁLISES COM AMOSTRAS DE ÁGUA RESIDUÁRIA

Variável	Método	Referência
Cor (UH)	Colorimétrico	APHA (1998)
Turbidez (NTU)	Nefelométrico	APHA (1998)
pH (unidades de pH)	Potenciométrico	APHA (1998)
Temperatura (°C)	Termométrico	APHA (1998)
DBO ₅ (mg/l)	Incubação a 20° C por 5 dias	APHA (1998)
DQO (mg/l)	Refluxo aberto- titulação colorimétrica	APHA (1998)
COT (mg/l)	Analizador de carbono orgânico	SHIMADZU (2003)
Conjunto de Sólidos (mg/l)	Gravimétrico	APHA (1998)
Alcalinidade total (mg _{CaCO3} /l)	Titulação potenciométrica	APHA (1998)

FONTE: O autor (2011)

QUADRO 3.2 – PARÂMETROS BIOLÓGICOS PARA AS ANÁLISES COM AMOSTRAS DE ÁGUA RESIDUÁRIA

Variável	Método	Referência
Coliformes totais (NMP/100ml)	Técnica do substrato cromogênico (Colilert®)	Higaskino <i>et al.</i> (2000) e Melo <i>et al.</i> (2001)
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	Técnica do substrato cromogênico (Colilert®)	Higaskino <i>et al.</i> (2000) e Melo <i>et al.</i> (2001)

FONTE: O autor (2011)

Os equipamentos utilizados para a medição dos parâmetros monitorados durante os testes foram:

- a) pHmetro Qualxtron, modelo QX 1500 Plus, pH/mV com RS 232;
- b) Turbidímetro portátil, marca HACH, modelo 2100P, com faixa de leitura de 0 – 1000 NTU;
- c) Medidor/comparador colorimétrico, marca HACH, modelo DR/890;
- d) Bloco digestor de DQO, marca Merck, modelo TR 300, com

temperatura máxima de 150 °C;

- e) Bloco digestor de DQO, marca Hach, modelo DRB 200, com temperatura máxima de 150 °C;
- f) Analisador de carbono orgânico (*TOTAL ORGANIC MATTER*) marca Shimadzu, modelo TOC-V 5000-A;
- g) Balança analítica digital marca SARTORIUS, modelo BL210S;
- h) Estufa marca ODONTOBRÁS, modelo 1.1;
- i) Mufla, marca Fornitec, ano 2003, nº 2936;
- j) Espectrofotômetro marca Shimadzu, modelo UV-160 1 PC.

3.2.2 Ensaios de pós-tratamento por coagulação/floculação

3.2.2.1 Materiais

Para os ensaios de coagulação/floculação seguido de sedimentação foi utilizada uma unidade experimental tipo *Jar Test*, marca D tomé, o qual apresenta as seguintes características (Figura 3.4):

- a) Ajuste contínuo de velocidade podendo variando de 20 a 120 rpm com variação menor que 17%;
- b) Rotor de agitação em aço inox com diâmetro de 7,6 cm e área de 45,3 cm²;
- c) Seis beakers de vidro com capacidade para um litro cada;
- d) Distribuidor simultâneo de dosagem;
- e) Sistema de agitação por tração mecânica.

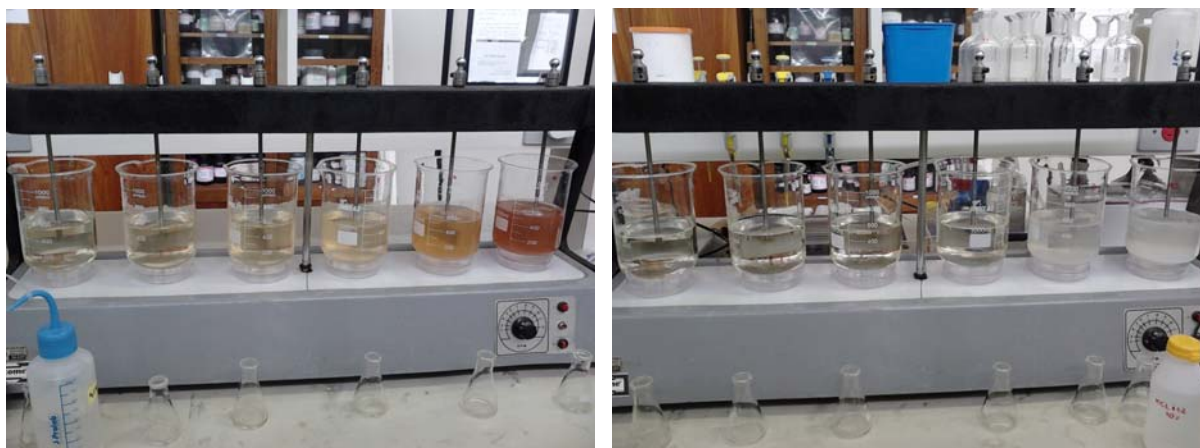


FIGURA 3.4 – UNIDADE EXPERIMENTAL TIPO JAR TEST UTILIZADO NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE SEDIMENTAÇÃO

FONTE: O autor (2011)

Para os ensaios de flotação foi utilizada uma unidade experimental tipo *Jar Test*, marca MILAN, o qual apresenta as seguintes características (Figura 3.5):

- a) Câmara de pressurização constituída de acrílico com seção transversal circular, com diâmetro, espessura, volume e altura de 100 mm, 10 mm, 2,5 l, 320 mm. A câmara resiste a uma pressão de 80 mca. Dentre os dispositivos da câmara de pressurização estão: válvula reguladora de pressão com filtro, registro de esfera para entrada de ar sob pressão, manômetro, dispositivo silenciador e registro de agulha para ajuste fino de pressão na câmara. A base da câmara é dotada de três registros de esfera com função de regular a entrada de água clarificada para recirculação, entrada de ar e saída de água saturada com ar. Para pressurização da câmara de saturação e consequentemente a condução de ar, foi acoplada ao equipamento um compressor de ar modelo TWISTER, com pressão máxima de 120 lbf/pol², da marca SCHULZ. Este foi ligado à válvula reguladora de pressão e acionado de acordo com as recomendações do Manual de Instruções do compressor.
- b) Jarros de coagulação – floculação – flotação. Os jarros são de acrílico transparente e possuem dimensão de 115x115 mm², nele ocorrem as etapas de coagulação – floculação – flotação. A base é

composta por duas placas de acrílico espaçadas de 5 mm. A placa inferior possui canais condutores de água saturada com ar (água de recirculação) com espessura de 2,5 a 5 mm e tem como objetivo conduzi-la e distribuí-la com maior rapidez preenchendo o espaço situado abaixo da placa superior, a qual contém 121 orifícios de 2 mm de diâmetro, espaçados 10mm, que proporcionam perda de carga suficiente para tal distribuição.

- c) Agitadores. São de aço inox do tipo paleta de eixo vertical que medem 25x75 mm². As rotações são programadas em rampa no visor do equipamento, de acordo com o tempo desejado.
- d) Sistema de Condução de Ar e Água saturada: Este sistema consiste em mangueiras de poliuretano que resistem à alta pressão, registros de esfera e tês de conexão rápida empregados em sistemas pneumáticos.



FIGURA 3.5 – UNIDADE EXPERIMENTAL TIPO JAR TEST UTILIZADO NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE FLOTAÇÃO

FONTE: O autor (2011)

Para o tratamento de coagulação-floculação foram realizados testes utilizando como coagulante os seguintes produtos:

- a) Sulfato de alumínio P.A.: cristalizado, comercializado pela empresa Quimibrás Indústria Química S.A. contendo as seguintes características expressas no rótulo:
- Fórmula: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - 14 \text{ a } 18 \text{ H}_2\text{O}$
 - Especificações A.C.S.:
 - i. Dosagem: 98 a 102%;
 - ii. Limite máximo de impurezas: Cloreto (Cl) 0,005%; Arsênio (As) 0,5ppm; Insolúveis 0,01%;
 - iii. Substâncias não precipitáveis por NH_4OH (como SO_4) 0,2%;
 - iv. Metais pesados (como Pb) 0,001%;
 - v. Ferro (Fe) 0,002%;
 - vi. pH (solução a 1%): 3,80.
- b) Cloreto Férrico: cristalizado, comercializado pela empresa Quimibrás Indústria Química S.A. contendo as seguintes características expressas no rótulo:
- Fórmula: FeCl_3
 - Densidade: 2,80 g/cm³
- c) Tanfloc SG: coagulante vegetal a base de tanino, catiônico (fornecido pela empresa Tanac S.A.) Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:
- Estado físico: Líquido
 - Densidade (g/cm³): 1,14
 - pH: 1,3 – 2,3
 - Sólidos Totais: 30 a 34 %
 - Solvente: exclusivamente água
- d) KCL 112: Agente coagulante e desemulsificante a base PAC (policloreto de alumínio), produzido pela empresa Kurita. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:
- Natureza Química: Sal inorgânico
 - Estado físico: Líquido
 - Forma: Líquido
 - Odor: Característico
 - Cor: Amarelo a âmbar

- Temperatura de auto-ignição: Ausente
 - Densidade (g/cm^3): $1,37 \pm 0.05$
 - Solubilidade: Solúvel em todas as proporções
 - Estabilidade: Estável
- e) KCL 193: Mistura de agentes coagulantes orgânico e inorgânico a base de PAC (policloreto de alumínio), produzido pela empresa Kurita. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:
- Natureza Química: Polímero inorgânico
 - Estado físico: Líquido Viscoso
 - Forma: Líquida
 - Odor: Característico
 - Cor: Amarelo a Âmbar
 - pH (bruto): $< 1,5$
 - Temperatura de auto-ignição: Ausente
 - Densidade (g/cm^3): $1,30 \pm 0,05$
 - Solubilidade: Solúvel em todas as proporções
 - Estabilidade: Estável

Para auxiliar a coagulação foram usados os seguintes produtos, todos sintéticos e orgânicos:

- a) KFCP 604: Polímero fortemente catiônico produzido pela empresa Kurita. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:
- Estado físico: Sólido
 - Forma: Pó
 - Odor: Característico
 - Cor: Branco
 - pH (Sol. 0.2%): $2.8 - 3.5$
 - Temperatura de auto-ignição: Ausente
 - Solubilidade: Solúvel em água.
 - Estabilidade: Estável.
- b) KFPA 329: Floculante aniônico com alto peso molecular produzido pela empresa Kurita. Abaixo as principais características físico-químicas:
- Estado físico: Sólido

- Forma: Pó
 - Odor: Característico
 - Cor: Branco
 - Temperatura de auto-ignição: Ausente
 - Solubilidade: Solúvel em água.
 - Estabilidade: Estável.
- c) KFPN 174: Polímero não iônico produzido pela empresa Kurita. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:
- Estado físico: Sólido
 - Forma: Pó
 - Odor: Característico
 - Cor: Branco
 - Temperatura de auto-ignição: Ausente
 - Solubilidade: Solúvel em água.
 - Estabilidade: Estável.

3.2.2.2 Métodos para coagulação/floculação seguido de sedimentação

Foi efetuado ensaio de *Jar Test* ou teste de jarro com a finalidade de verificar a tratabilidade do efluente pelos processos de coagulação, floculação, sedimentação e flotação. A concentração utilizada para os coagulantes foi de 10% enquanto dos polímeros ou auxiliares de coagulação foi de 0,1%. Foram analisadas nos ensaios as características de cor, turbidez, DQO e fisionomia dos flocos produzidos. Os testes com coagulantes e polieletrólitos de diferentes marcas seguiram a seguinte metodologia de análise.

3.2.2.2.1 Determinação da melhor faixa de pH e do tempo de sedimentação

Para otimizar o desempenho dos coagulantes estudados foi determinada a melhor faixa de pH. Para tanto foi adicionada uma concentração de 200 ppm do coagulante nos seis jarros contendo 500 ml de amostra. Após homogeneização foram adicionadas concentrações variadas de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl) a 0,1 M que determinaram uma variação do pH de 5,0 a 10,0, com

intervalos de 1,0. A solução foi agitada a 120 rpm por 1 minuto e posterior agitação lenta (20 rpm) por mais 15 minutos para facilitar a floculação sem romper os flocos formados. Terminada a fase de agitação lenta aguardou-se 5, 15, 30 e 60 minutos para sedimentação do lodo e analisou-se a formação dos flocos, o pH de operação, a cor, a turbidez e a DQO a cada intervalo, conseguindo-se, assim, determinar o melhor tempo de sedimentação e o jarro com pH de melhor tratabilidade (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1979). O critério escolhido para selecionar o melhor jarro foi o que obteve melhor formação de flocos e menores valores de cor, turbidez e DQO do sobrenadante. Como a maioria já estava dentro dos parâmetros permitidos de turbidez menor que 5 NTU, o parâmetro principal foi a cor.

Após a escolha do tempo de sedimentação ideal e do jarro com pH contendo melhor desempenho repetiu-se o teste de pH do melhor jarro variando o seu intervalo em 0,5 ponto, para menos e para mais, no intuito de confirmar o pH ideal com um espectro menor de intervalo.

3.2.2.2.2 Determinação da concentração dos coagulantes

Após conhecido o pH ideal e o tempo de sedimentação ótimo para cada teste, realizaram-se os ensaios para determinar a concentração ideal de coagulante para melhor remoção dos contaminantes da água. As faixas de concentrações da solução dos coagulantes foi de 10% (100 mg para 1l para os sólidos e para o Tanfloc SG que era líquido, para cada 10 ml da sua solução comercial completava-se o volume total de 100 ml com água destilada) enquanto dos polímeros e auxiliares de coagulação de 0,1% (1g para 1l). O critério de escolha da melhor dosagem seria o jarro que proporcionasse a melhor formação de flocos e menores valores para cor, turbidez e DQO.

Cada um dos cinco coagulantes analisados passaram por testes com os três polímeros separadamente (catiônico, aniônico e não-iônico).

Primeiramente foram adicionadas dosagens de 50, 100, 200, 300, 400 e 500 ppm de cada coagulante aos jarros com 500 ml de amostra, já com pH ótimo. Os jarros que apresentassem melhor desempenho eram refeitos o teste utilizando concentração variavam entre ambos com intervalos de 20 ppm. Os procedimentos de coagulação, floculação, sedimentação e coleta do sobrenadante para a avaliação físico-química, foram feitos conforme descrito em AZEVEDO NETTO *et al.*, (1979).

3.2.2.2.3 Determinação da concentração dos auxiliares de coagulação

De posse da concentração ótima de cada coagulante nos testes efetuados, partiu-se para a determinação da concentração ideal dos auxiliares de coagulação. Neste caso, como no caso dos coagulantes, a escolha das faixas de concentração e preparação de cada produto foi obtida através de consulta aos catálogos e a seus representantes regionais.

Para cada teste foram adicionadas as concentrações de 0,10, 0,50, 1,00, 2,00, 4,00 e 10,0 ppm de cada polímero aos jarros com 500 ml de amostra, já com pH ótimo corrigido e concentração ótima do coagulante. Ao término de cada teste analisaram-se os mesmos parâmetros analisados na determinação da concentração ótima do coagulante.

3.2.2.3 Métodos para coagulação/floculação seguido de flotação

A partir dos melhores resultados de pH, concentração de coagulantes e auxiliares, tempo de sedimentação, foram realizados os testes de coagulação/floculação seguido da flotação. Foram realizados os ensaios de tratamento, separados nas fases: mistura rápida, mistura lenta e flotação no equipamento flotatest. A taxa de recirculação de água aerada nos jarros foi de 50 e de 100 %, e a pressão de saturação utilizada foi de 5 mca. Esses altos valores de taxa de recirculação foram utilizados porque nas indústrias de painéis existe um alto teor de material em suspensão e também para evitar que houvesse problemas hidráulicos nos ensaios. A dosagem dos reagentes foi fixada de acordo com os ensaios realizados anteriormente.

3.2.3 Comparação com padrões de reúso

Depois de realizados os ensaios de pós-tratamento físico-químico, os resultados da DQO, sólidos, cor e turbidez serviram para verificar sua adequação aos padrões de reúso, seus resultados foram comparados com as diretrizes da legislação americana U.S. E.P.A. - *Environmental Protection Agency* (2004).

3.3 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

Os resíduos utilizados como matérias-primas para o reaproveitamento foram: (i) cinzas de queima de madeira da produção de painéis de MDF de uma empresa situada na região de Araucária (PR), como absorvente para retirar a umidade e também como carga mineral; (ii) lodo físico-químico de ETE da mesma empresa e (iii) resíduo da produção de cal (RPC) de uma fábrica de Colombo (Paraná), como material ligante.

A necessidade de se reaproveitar alguns resíduos como o lodo proveniente do tratamento físico-químico da ETE é baseada nos fatores como quantidade significativa, aproximadamente 4680 ton/ano; custo de disposição elevado em aterro industrial; odor; proibição de sua queima em caldeira especificada pelo Artigo 3 da Resolução SEMA 42, de 22 de julho de 2008 (IAP, 2011); além da dificuldade de reaproveitamento dos resíduos. Já a respeito das cinzas da queima da madeira sua produção é de 8400 ton/ano e por ainda apresentar pedaços de madeira em sua composição esta poderia ser reincorporada à caldeira para um melhor aproveitamento do seu calor específico, ou ser utilizada nos campos de reflorestamento como fertilizante.

Os resíduos da produção de cal são resíduos da indústria calcária da produção de cal para construção civil, obtida pela calcinação do calcário, constituído essencialmente de cal e elementos, não calcários (Al_2O_3 - alumina, SiO_2 - sílica, Fe_2O_3 - óxido de ferro, etc.) em quantidade totais maiores do que 12% (ABNT 6453:2003). A definição pelo seu uso neste trabalho foi baseada em 2 itens: suas propriedades aglomerantes e sua disponibilidade em grande quantidade, além, é claro, de minimizar seu impacto junto ao meio ambiente.

Foram realizadas ações voltadas para o lodo físico-químico e as cinzas da queima da madeira da indústria de painéis de MDF, misturados aos resíduos da indústria de cal, para o desenvolvimento de um produto com características que permitam sua utilização na área de construção civil. Esta etapa exigiu 6 meses de testes, desde a confecção dos corpos de prova (mistura dos resíduos em estudo) até os demais testes citados no item 3.3.3, a fim de verificar a resistência dos corpos de prova (CP's) e suas possíveis mudanças químicas, mineralógicas e mecânicas. A amostragem foi realizada em conformidade com a NBR 10.007 (2004), constituindo-se uma amostra representativa.

3.3.1 Caracterização das matérias-primas

Inicialmente as matérias-primas (cinzas de queima da madeira, lodo físico-químico e resíduo da produção de cal) foram secas na estufa a 100° C por 2 dias e pulverizadas com o auxílio do moinho de tungstênio.

Desta forma, esses materiais foram preparados para caracterização quanto: teor de umidade, composição química por Raios X – Fluorescência (FRX), composição mineralógica por Raios X – Difractometria (DRX), as análises de difração de Raios X (DRX) e fluorescência de Raios X (FRX), perda a fogo, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e micro-análise química (EDS), conforme apresentado no Quadro 3.3 e mais explicadas na seção 3.3.3.

QUADRO 3.3 – ANÁLISES LABORATORIAIS PARA O LODO FÍSICO-QUÍMICO E PARA AS CINZAS

Amostra	Análises
Lodo Físico-Químico e Cinzas	Teor de umidade
	Composição química por Raios X – Fluorescência (FRX)
	Composição mineralógica por Raios X – Difractometria (DRX)
	Perda a fogo
	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
	Micro-análise química (EDS)

FONTE: O autor (2011)

As análises de MEV-EDS foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Bosch de Araucária (Paraná). As demais análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LTA); Laboratório de Engenharia Ambiental Prof. Francisco Borsari Netto (LABEAM), do Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS); no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR), do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no Campus Centro Politécnico.

Os procedimentos físico-químicos realizados estão de acordo com a metodologia especificada pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) e normas técnicas brasileiras, como a NBR 10.007

(ABNT, 2004) para a obtenção de uma amostra representativa.

Por impossibilidade laboratorial não foi realizado testes de solubilização e lixiviação com o lodo físico-químico para controle do alumínio presente no mesmo.

3.3.2 Confecção dos corpos de prova

Para a geração do novo produto com características adequadas para uso na construção civil foram preparados corpos de prova através da mistura de diferentes composições dos resíduos: lodo proveniente do tratamento físico-químico, cinzas provindas da queima da madeira e rejeitos da indústria de cal. O diferencial de seu preparo foi a utilização apenas de pressão, sem uso de forno nem secagem preliminar e a ausência de adição de cimento Portland. Por não ser feito em fornos, a fabricação deste tijolo implica na diminuição dos gastos energéticos com o processo, porém isto não afeta sua qualidade, uma vez que inclusive possui características físicas melhores que outros tijolos convencionais disponíveis no mercado.

Esta etapa foi desenvolvida no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LTA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), campus Centro Politécnico.

Para a preparação dos corpos-de-prova, procedeu-se a pesagem dos três materiais (lodo físico-químico, cinza e resíduo da indústria de cal) conforme as variadas composições sugeridas (7 diferentes proporções) na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – COMPOSIÇÕES DO CORPO-DE-PROVA

Composições	Proporções (%)		
	Lodo	Cinza	Cal
1	45	45	10
2	40	45	15
3	35	50	15
4	30	55	15
5	40	40	20
6	35	45	20
7	30	50	20

Para cada tipo de composição, foram confeccionados 45 corpos prova (CP), variando entre 10 e 12 gramas de acordo com as proporções requeridas, totalizando

um total de 315 CP's de 20 mm x 20 mm cada um.

Os materiais foram pesados em balança digital de três dígitos e colocados em graal de porcelana para melhor homogeneização. Depois de triturado com o pistilo, a mistura uniformemente homogênea foi colocada no molde de aço (Figura 3.6) para a confecção do CP. Cabe ressaltar que o molde utilizado na confecção dos corpos de prova foi fabricado em aço, material não absorvente e quimicamente inerte aos resíduos trabalhados, com as seguintes dimensões internas: 20 x 60 mm.

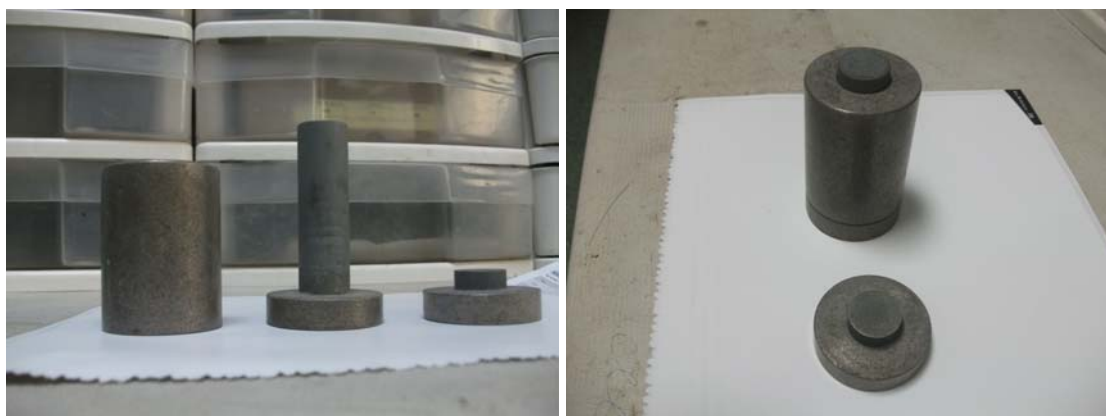


FIGURA 3.6 – MOLDE DE AÇO PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

FONTE: O autor (2011)

Após a mistura ser colocada no molde a mesma foi submetida à prensa uniaxial por 30 segundos com 5 MPa (Figura 3.7). Tendo em vista os recursos disponíveis, foi utilizada uma prensa manual para a sua compactação. Para minimizar a variabilidade dos dados os CP's foram moldados pela mesma pessoa.



FIGURA 3.7 – PRENSA MANUAL UTILIZADA PARA CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVA

FONTE: O autor (2011)

Depois de prensado, o CP foi desmoldado e identificado. Suas dimensões conferidas e anotadas no registro de dados.

3.3.3 Caracterização dos corpos de prova

As análises de MEV-EDS foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Bosch de Araucária (Paraná). As demais análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LTA); Laboratório de Engenharia Ambiental Prof. Francisco Borsari Netto (LABEAM), do Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS); no Laboratório de Materiais (LaMats) do Departamento de Engenharia Mecânica; no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR), do Departamento de Geologia, todos da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no Campus Centro Politécnico.

Estes ensaios laboratoriais foram realizados a fim de caracterizar, avaliar as composições químicas e mineralógicas dos CP's confeccionados, assim como suas características mecânicas.

As análises realizadas foram: resistência à compressão uniaxial, resistência à água, absorção à água, composição mineralógica por Raios X – Difractometria (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), micro-análise química (EDS) e dilatometria. Ensaio com os corpos-de-prova duraram no mínimo 4 meses a fim de verificar sua resistência e mudanças mineralógicas.

As análises laboratoriais para os corpos-de-prova gerados estão reunidas no Quadro 3.4 e mais explicados na sequência:

QUADRO 3.4 – ANÁLISES LABORATORIAIS PARA O CORPO-DE-PROVA

Amostra	Análises
Corpo de prova	Resistência à compressão uniaxial Resistência à água Absorção à água Composição mineralógica por Raios X – Difractometria (DRX) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) Micro-análise química (EDS) Dilatometria

FONTE: O autor (2011)

3.3.3.1 Análise de resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão pode ser definida como a tensão que ao ser atingida provoca no elemento um estado de limite último (MAIDA, 1989), significando, assim, a pressão máxima suportada pelo corpo de prova. A resistência à compressão é uma propriedade de grande importância na engenharia civil, pois traduz de certa forma a qualidade do material, estando diretamente relacionada à sua estrutura interna. Os valores obtidos nos ensaios de ruptura dos corpos de prova fornecem seu desempenho em termos mecânicos e consequente durabilidade (CORRÊA, 2005).

Após o tempo de cura, 5 corpos de prova de cada composição foram submetidos ao teste de resistência à compressão de acordo com a NBR 5.739 (ABNT, 1994). O rompimento dos corpos de prova foi realizado na prensa EMIC DL 10000 cel Trd 28 (Figura 3.8) do Laboratório de Materiais (LaMats) do Departamento

de Engenharia Mecânica da UFPR.



FIGURA 3.8 – PRENSA EMIC UTILIZADA PARA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: O autor (2011)

3.3.3.2 Análise de absorção e resistência à água

Para o ensaio de absorção de água por imersão foram empregados 5 corpos de prova para cada uma das 7 composições, para a idade de 60 e 90 dias, conforme definido na norma NBR 9.778 (ABNT, 2005).

O coeficiente de absorção da água foi calculada mediante a aplicação da Equação 3.1.

$$C_a = m_u - m_s \quad (3.1)$$

Em que:

C_a = coeficiente de absorção de água

m_u = massa do CP úmido (g)

m_s = massa do CP seco (g)

O coeficiente de resistência a água foi calculada mediante a aplicação da Equação 3.2.

$$C_{ra} = \frac{R_u}{R_s} \quad (3.2)$$

Em que:

C_{ra} = coeficiente de resistência à água

R_u = resistência do CP úmido (MPa)

R_s = resistência do CP seco (MPa)

3.3.3.3 Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)

Dentro do contexto das novas técnicas analíticas instrumentais, a espectrometria de fluorescência de Raios X ocupa um lugar de destaque, especialmente pela obtenção rápida do perfil de constituintes metálicos e não-metálicos. A análise de FRX possui características diferenciadas, como: (i) determinar multielementos simultâneos (de sódio até urânio); (ii) flexibilidade para análise qualitativa e quantitativa; (iii) operação com amostras sólidas e líquidas; (iv) não apresenta caráter destrutivo; e (v) não se detém à forma química em que as espécies de interesse se encontram (NAGATA *et al.*, 2001).

Segundo os mesmos autores, a FRX pode ser classificada como uma técnica de emissão atômica, fundamentada no efeito fotoelétrico. Como este processo envolve níveis de energia que são característicos de cada elemento, a radiação emitida para cada transição é também característica. Desta maneira, a energia da radiação emitida pode ser diretamente utilizada na identificação da espécie em questão. Por outro lado, como a intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à concentração da espécie, a técnica também fornece informações que podem ser utilizadas para fins quantitativos.

Quando se pretende analisar uma amostra totalmente desconhecida, a técnica de FRX também é vantajosa, principalmente em função da agilidade na obtenção de dados qualitativos dos constituintes da amostra.

Na técnica de FRX foi utilizado um equipamento de fluorescência,

espectrômetro, Philips modelo PW 2400. Apenas foram realizadas análises de FRX para a caracterização das matérias-primas (cinza, lodo e cal). A técnica constituiu em preparar o material e submetê-lo a feixes de Raios X, e posteriormente avaliar as composições químicas das amostras. Para o preparo, as amostras foram secas a 100 – 110 °C e pulverizadas. Foram pesadas 7g da amostra seca, e juntamente com 1,4g de cera foi preparada uma pastilha. Posteriormente a pastilha foi incidida pelos raios a fim de realizar sua análise.

3.3.3.4 Análise de Difractometria de Raios X (DRX)

Empregou-se a difração de Raios X com a finalidade de identificar as fases cristalinas do material em questão, pois esta análise oferece um modo conveniente para determinar a análise mineralógica dos sólidos cristalinos. Se um mineral é exposto a Raios X de um comprimento de onda específico, as camadas de átomos difratam os raios e produzem um padrão de picos que é característico do mineral. A escala horizontal (ângulo de difração) de um padrão de DRX típico fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado. Quando a amostra bombardeada com Raios X tem mais de um mineral, a intensidade de picos característicos dos minerais individuais é proporcional às suas quantidades (VERBECK, 1968).

As análises de DRX foram realizadas para a caracterização das matérias primas (cinza, lodo e cal) e para apenas uma composição do corpo de prova (composição nº 5) nas idades de 3, 14 e 60 dias. Na técnica de difração de Raios X foi utilizado um difratômetro marca Philips, modelo PW 1830, com ânodo de cobre K-alfa, comprimento de onda de 1,5405 Å, com tensão de 40KV, corrente de 40 mA e ângulo de varredura 2θ variou de 3° a 70°, com passo igual a 2° θ /min. O software para interpretação dos difratogramas utilizado foi o *X'spert High Score-Philips*, cujo banco de dados foi PDF2.

3.3.3.5 Análise de perda a fogo

Para a análise de perda a fogo, 2g da amostra foram pesadas em cadinho e depois levadas a mufla a 1000 °C por 2 horas. Após o cadinho esfriar o novo peso foi verificado e assim, calculada a porcentagem (%) de perda ao fogo. Apenas foram realizadas análises de perda a fogo para a caracterização das matérias-primas

(cinza, lodo e cal).

3.3.3.6 Análise de Microscopia eletrônica de varredura com microanálise química (MEV-EDS)

Segundo Picon *et al.* (2006), a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilita a observação e o registro de imagens tridimensionais detalhadas. Nesta técnica, um feixe de elétrons atravessa uma coluna de vácuo e incide, de forma oblíqua, na superfície da amostra. A superfície é então estudada de forma rasteira repetidamente, liberando elétrons secundários. A profundidade com que o elétron penetra a superfície promove emissões secundárias que é função da voltagem de aceleração e da densidade da amostra (AGUILERA e STANLEY, 1999).

O sistema de EDS (*Energy Dispersive System*) pode ser incorporado ao MEV com o objetivo de determinar a composição química qualitativa e semiquantitativa das amostras, por meio da emissão de Raios X (DUARTE *et al.*, 2003).

As análises de MEV-EDS foram realizadas para a caracterização das matérias primas (cinza, lodo e cal) e para apenas uma composição do corpo de prova (composição nº 5) nas idades de 3, 14 e 60 dias. Para esta análise, foram utilizadas amostras retiradas das matérias-primas e dos corpos de prova rompidos nos ensaios de resistência à compressão.

Como o material estudado não é condutor, foi necessário primeiramente metalizar a superfície dele com uma camada de ouro. Para a metalização com camada de ouro foi utilizado o metalizador SCD 030 Balzers union FL 9496, de 220V, do Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR, por 2 minutos com ouro de 99,99% de pureza. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura, marca FEI, modelo quanta 200 ambiental, resolução de 140.000 vezes com padrão de ouro, equipado com EDS, marca Oxford, modelo 6427, com resolução de 137 eV e as imagens obtidas foram registradas em arquivo digital do Laboratório de microscopia eletrônica da Bosh (Araucária, Paraná).

3.3.3.7 Análise de dilatometria

Para a análise de dilatometria, foi medido o diâmetro do corpo de prova com 90 e 180 dias com um paquímetro digital DIG MESS. Para cada composição foram usados 5 CP's para se obter um resultado mais representativo.

A porcentagem de dilatação foi calculada mediante a aplicação da Equação 3.3.

$$\%Dilatação = \frac{[(d - 20) \times 100]}{20} \quad (3.3)$$

Em que:

$\%Dilatação$ = porcentagem de dilatação

d = diâmetro medido do CP com 90 dias (mm)

20 = diâmetro inicial do corpo de prova de 20 mm

100 = fator conversão para porcentagem

3.3.4 Comparação com padrões da legislação brasileira

Para o reaproveitamento de resíduos para a construção civil, os corpos-de-prova foram elaborados com diferentes combinações, visando encontrar a combinação ótima em termos de absorção de água e resistência à compressão, segundo as normas técnicas brasileiras. A amostragem foi realizada em conformidade com a NBR 10.007 (2004), constituindo-se uma amostra representativa. Após prontos os corpos de prova deveriam possuir características que atendam a norma brasileira NBR 7170 de 1983 (tijolos maciços) e a NBR 7171 de 1992 (blocos cerâmicos).

Na NBR 7170 (ABNT, 1983), a resistência uniaxial dos tijolos maciços deve ser menor do que 2,5 MPa, para a classe A, entre 2,5 e 4,0 MPa, para classe B e maior do que 4,0 MPa, para classe C.

E de acordo com a NBR 7171 (ABNT, 1992), a resistência uniaxial dos blocos cerâmicos deve apresentar valores entre 1,5 e 2,5 MPa, para a classe 15, e entre 2,5 e 4,5 MPa, para a classe 25.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a realização das etapas deste estudo.

4.1 MINIMIZAÇÃO NO LANÇAMENTO DE RESÍDUOS

4.1.1 Caracterização da água residuária

A água residuária foi inicialmente caracterizada quanto a cor, turbidez, pH, temperatura, DQO, conjunto de sólidos suspensos e totais, alcalinidade e coliformes totais e tolerantes. Os resultados estão apresentados no Quadro 4.1.

A cor da água residuária neste caso é mais um fator estético e está mais relacionada com material dissolvido, uma vez que há pouca turbidez indicando baixa concentração de material particulado. Como a turbidez já está dentro dos valores permitidos pela Resolução CONAMA nº 357 (2005), a cor foi usada como parâmetro principal na escolha dos melhores resultados do pós-tratamento físico-químico estudado neste trabalho.

Na quantificação dos coliformes totais e termotolerantes os valores extrapolaram na primeira diluição testada, assim se fez necessário testar novas diluições. A análise microbológica foi realizada apenas na última coleta da água residuária.

QUADRO 4.1 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA

Data	Temp (°C)	pH	Turbidez (NTU)	Cor (uH)	Alcal. Tot. (mg/l)	COT (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	Sólidos (mg/l)	Colif. (NMP/100ml)
15/06/11	11,9	7,1	5,3	80	N.A.	COT = 51,2 CT = 79,5 e CI = 28,3	396,8	110,2	ST= 3387 STF = 3003 e STV = 384 SST = 131 SSF = 116 e SSV = 15	N.A.
25/08/11	17,7	7,9	4,7	85	187 ± 4,2	COT = 46,1 CT = 73,4 e CI = 31,2	225,6	90,2	ST = 3029 STF = 2451 e STV = 578 SST = 24 SSF = 16 e SSV = 8	N.A.
11/10/11	21,4	7,8	4,2	45	387 ± 18,4	COT = 40,2 CT = 111,6 e CI = 71,4	265,8	88,6	N.A.	N.A.
16/11/11	23,0	7,7	9,9	97	230 ± 8,5	COT=32,9 CT= 131,9 e CI=98,9	256,6	89,8	ST = 2285 STF = 1840 e STV = 445 SST = 23 SSF = 11 e SSV = 12	N.A.
07/12/11	22,1	7,6	5,9	103	253 ± 5,3	COT=44,7 CT= 146,2 e CI=101,5	351,2	100,3	ST = 2050 STF = 1756 e STV = 294 SST = 28 SSF = 14 e SSV = 14	Colif Total: 2,4.10 ³ Colif Term: 1,3.10 ²

Notas: N.A. – Não analisado; ST – Sólidos Totais; STF – Sólidos Totais Fixos; STV – Sólidos Totais Voláteis; SST- Sólidos Suspensos Totais; SSF- Sólidos Suspensos Fixos; SSV- Sólidos Suspensos Voláteis.

FONTE: O autor (2011)

4.1.2 Ensaios de pós-tratamento por coagulação/floculação

4.1.2.1 Coagulação/floculação seguido de sedimentação

O Quadro 4.2 apresenta o resumo dos testes para determinação do pH, tempo de sedimentação, e as concentrações ótimas dos coagulantes. Os dados completos desta etapa podem ser visualizados no Apêndice A (Quadros A.1 e A.2). Esta etapa antecedeu aos ensaios para escolha da melhor concentração dos auxiliares de coagulação.

QUADRO 4.2 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A DETERMINAÇÃO DO pH, DO TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO ÓTIMOS DOS COAGULANTES

Teste	Coagulante	pH ótimo	Tempo ótimo de sedimentação (min)	Concentração ótima de coagulante (ppm)
Teste 01	Sulfato de alumínio	6,0	15	140
Teste 02	Cloreto férrico	9,0	15	160
Teste 03	Tanfloc SG	9,0	15	200
Teste 04	KCL 112	9,0	15	300
Teste 05	KCL 193	8,0	15	160

FONTE: O autor (2011)

Após a determinação do melhor pH e da concentração ótima de cada coagulante, foram determinadas as melhores concentrações dos auxiliares de coagulação (polímeros). O Quadro 4.3 apresenta o resumo dos testes para determinação das concentrações ótimas dos auxiliares de coagulação utilizados na pesquisa. Os dados completos desta etapa podem ser visualizados no Apêndice A através dos Quadros A.3 ao A.5.

QUADRO 4.3 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES ÓTIMAS DOS AUXILIADORES DE COAGULAÇÃO

Polímeros	Coagulantes (ppm)				
	Al ₂ (SO ₄) ₃	FeCl ₃	Tanfloc SG	KCL 112	KCL 193
KFCP 604 – catiônico	1,00	2,00	4,00	2,00	4,00
KFPA 329 – aniônico	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
KFPN 174 – não-iônico	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00

FONTE: O autor (2011)

O Quadro 4.4 apresenta os resultados para a DQO, cor, turbidez, e Conjunto de sólidos obtidos após coagulação-floculação com os coagulantes e auxiliares de coagulação. A DQO sofreu uma redução satisfatória para todos os casos, mostrando que os produtos escolhidos estavam de acordo com o objetivo do ensaio.

A menor geração de lodo foi verificado para os ensaios que utilizaram o sulfato de alumínio como coagulante, contrário do coagulante cloreto férrico cujos volumes de lodo produzidos foram maiores. Segundo Piantá (2008) o uso de coagulantes orgânicos de origem vegetal à base de tanino, neste caso o Tanfloc, possui a vantagem de gerar menor quantidade de lodo, fato esse verificado quando compara-se o Tanfloc com o cloreto férrico.

Foi também o sulfato de alumínio que possibilitou a maior redução de cor da água residuária tratada pós coagulação/floculação. No caso do Tanfloc por ser de característica marrom âmbar houve aumento de sua coloração. Já com os coagulantes KCL 112 e 193, o aumento da cor no meio é devido a característica opaca que o meio adquiriu.

O melhor decaimento de turbidez foi evidenciado para o coagulante KCL 193 quando utilizado em conjunto do auxiliar de coagulação não-iônico KFPN 174.

Observou-se uma tendência de elevação na turbidez nos testes que utilizaram o coagulante Tanfloc, uma vez que sua coloração marrom âmbar formou uma mistura mais escura e opaca.

Para os parâmetros ST, as amostras apresentaram boas reduções. O coagulante que promoveu a maior redução do ST foi o cloreto férrico na presença do polímero catiônico KFCP 604. O teste obteve valores próximos ao encontrado com o coagulante KCL 193 m conjunto com o mesmo auxiliar de coagulação catiônico.

Para o teste com sulfato de alumínio, o polímero que apresentou melhor desempenho foi o catiônico KFCP 604 havendo remoção de 72, 78% para o SST.

QUADRO 4.4 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE SEDIMENTAÇÃO

Coagulante e conc. (ppm)	pH ótimo	Conc. polímero (ppm)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	Volume de sólidos (ml)	ST (mg/l)	STF (mg/l)	STV (mg/l)	SST (mg/l)	SSF (mg/l)	SSV (mg/l)	DQO (mg/l)
Amostra	7,69	-----	90	4,2		3528	3150	378	360	60	300	174,7
Al₂(SO₄)₃ - 140ppm	6,0	KFCP 604 – 1,00 ppm	11	0,9	9	2288	1682	606	98	50	48	26,8
		KFPA 329 – 2,00 ppm	27	1,9	9	2440	1886	554	168	110	58	35,4
		KFPN 174 – 2,00 ppm	42	3,1	8	1764	1246	518	104	48	56	43,6
FeCl₃ - 160ppm	9,0	KFCP 604 – 2,00 ppm	61	1,5	33	1336	386	950	640	442	198	121,5
		KFPA 329 – 2,00 ppm	17	1,2	25	2798	2034	764	997	888	358	87,9
		KFPN 174 – 2,00 ppm	43	1,9	26	2448	1748	700	762	540	222	65,2
Tanfloc SG - 200ppm	9,0	KFCP 604 – 4,00 ppm	204	16,9	14	2532	1580	952	430	188	242	160,3
		KFPA 329 – 2,00 ppm	151	2,2	15	2278	1394	884	368	184	184	143,2
		KFPN 174 – 1,00 ppm	147	1,4	33	2632	1688	944	504	228	276	122,2
KCL 112 - 300ppm	9,0	KFCP 604 – 2,00 ppm	43	1,2	22	3336	2386	950	326	214	112	154,3
		KFPA 329 – 2,00 ppm	49	1,5	22	2128	1456	672	976	658	318	139,9
		KFPN 174 – 2,00 ppm	39	2,4	18	3390	2804	586	722	502	220	149,9
KCL 193 - 160ppm	8,0	KFCP 604 – 4,00 ppm	47	1,6	12	1338	934	404	220	146	74	157,8
		KFPA 329 – 2,00 ppm	48	1,8	11	2182	1502	680	218	132	86	134,4
		KFPN 174 – 2,00 ppm	62	0,7	11,5	1610	1176	434	182	90	92	128,8

Notas: N.A. – Não analisado; ST – Sólidos Totais; STF – Sólidos Totais Fixos; STV – Sólidos Totais Voláteis; SST- Sólidos Suspensos Totais; SSF- Sólidos Suspensos Fixos; SSV- Sólidos Suspensos Voláteis.

FONTE: O autor (2011)

4.1.2.2 Coagulação/floculação seguido de flotação

Foram realizados ensaios de Flotação com os melhores resultados, com adição de água aerada com 50 e 100% do volume total, apresentados no Quadro 4.5.

O aumento na taxa de recirculação não necessariamente significou melhor remoção de DQO. A taxa de 50% garantiu melhores resultados para os coagulantes: sulfato de alumínio, Tanfloc e KCL 112. Porém o aumento para 100% da taxa de recirculação respondeu positivamente para os coagulantes: cloreto férrico e KCL 193, nos quais houve menores valores de DQO, apenas com exceção do KCL 193 quando auxiliado pelo polímero catiônico KFCP 604.

As remoções de DQO em um contexto geral não foram satisfatórias para os coagulantes KCL 112 e 193. Porém para os demais sim, com ordem decrescente de eficiência pelo sulfato de alumínio, seguido do cloreto férrico e seguido do Tanfloc.

A diminuição do valor da DQO foi para o sulfato de alumínio em conjunto do polímero aniônico KFPA com taxa de recirculação de 50%. Já o pior resultado encontrado foi o que utilizou o coagulante KCL 112 com KFPA a 100%

A respeito da redução da cor, a melhor redução encontrada foi a que utilizou cloreto férrico com KFPA e 50% de recirculação de água aerada. O aumento da cor para os ensaios com Tanfloc e cloreto férrico pode ser possivelmente explicado pela coloração original deles, amarronzadas. Porém o que se destacou foi que houve casos onde a utilização de coagulantes (KCL 112 e 193) não reduziu em nada a cor do meio, o mantendo em valores similares ao encontrado anteriormente ao tratamento.

A turbidez obteve reduções em todos os ensaios testados, com destaque maior para o jarro que utilizou sulfato de alumínio com o polímero catiônico KFCP 604 a 50%, seguido do KCL 112 com KFCP 604. A menor redução de turbidez com a associação do Tanfloc com KFPN e uma taxa de recirculação de 100%.

QUADRO 4.5 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE FLOTAÇÃO

Coagulante e conc.	pH ótimo	Conc. polímero	Tx recirculação	Cor	Turbidez	DQO
Amostra				56	9,4	149,2
Al₂(SO₄)₃ 140ppm	6,0	KFCP 604 – 1,00 ppm	50%	27	0,6	56,9
			100%	10	0,7	38,3
		KFPA 329 – 2,00 ppm	50%	11	1,2	40,3
			100%	18	1,1	107,3
		KFPN 174 – 2,00 ppm	50%	32	2,2	51,6
			100%	30	2,1	60,6
FeCl₃ 160ppm	9,0	KFCP 604 – 2,00 ppm	50%	48	3,9	56,8
			100%	35	1,6	55,6
		KFPA 329 – 2,00 ppm	50%	8	4,3	215
			100%	32	2,8	74,9
		KFPN 174 – 2,00 ppm	50%	59	3,8	92,6
			100%	44	2,9	72,9
Tanfloc SG 200ppm	9,0	KFCP 604 – 4,00 ppm	50%	45	2,5	127,6
			100%	20	5,2	191,6
		KFPA 329 – 2,00 ppm	50%	80	3,1	76,3
			100%	17	4,7	98,6
		KFPN 174 – 1,00 ppm	50%	90	1,6	83,3
			100%	35	7,3	122,9
KCL 112 300ppm	9,0	KFCP 604 – 2,00 ppm	50%	45	2,1	128,3
			100%	40	0,9	132,9
		KFPA 329 – 2,00 ppm	50%	15	1,7	112,6
			100%	55	3,0	229,3
		KFPN 174 – 2,00 ppm	50%	40	2,1	115,9
			100%	55	13,3	178,9
KCL 193 160ppm	8,0	KFCP 604 – 4,00 ppm	50%	45	0,9	126,9
			100%	29	1,6	228,6
		KFPA 329 – 2,00 ppm	50%	50	2,3	168,9
			100%	56	3,9	145,9
		KFPN 174 – 2,00 ppm	50%	47	1,9	148,6
			100%	56	4,6	130,3

FONTE: O autor (2011)

4.1.2.3 Comparação dos ensaios de coagulação/floculação seguido de sedimentação e flotação

As eficiências das reduções de DQO dos ensaios são demonstrados no Quadro 4.6.

Comparando os dois ensaios foi possível verificar que a coagulação/floculação seguida de sedimentação é a mais eficiente, pois houve maiores reduções do valor da DQO.

Em ambos os casos as melhores reduções de DQO foram verificadas quando foi utilizado o coagulante sulfato de alumínio, nos quais houve destaque para o uso do polímero catiônico KFCP 604. Porém o uso do polímero aniônico KFPA 329 em ambos os casos também trouxe resultados satisfatórios.

O segundo coagulante testado que apresentou as melhores reduções de DQO foi o cloreto férrico, o qual também é muito utilizado nas indústrias mesmo que não apresente resultados tão acentuados como os vistos pelo sulfato de alumínio (MANCUSO, 2000; RICHTER, 2009).

As piores reduções de DQO no ensaio seguido de sedimentação foi o que usou o coagulante Tanfloc SG com o polímero catiônico KFCP 604 (160,3 mg/l), e no seguido de flotação foi o coagulante KCL 112 com o polímero aniônico KFPA 329 (229,3 mg/l). Porém os resultados ruins destes não ficaram tão longes dos verificados quando utilizado o coagulante KCL 193, que também não se mostrou muito eficiente quando comparado com os demais testados.

Outro fato interessante do uso da coagulação/floculação seguido de sedimentação é que haverá um menor gasto energético, uma vez que na flotação é preciso realizar a recirculação com o bombeamento de bolhas de ar.

QUADRO 4.6 – COMPARAÇÃO DAS REDUÇÕES DE DQO NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO SEGUIDO DE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO

Coagulante e conc.	pH ótimo	Conc. polímero	Coagulação	Flotação	
			DQO (mg/l)	Tx recir- Culação	DQO (mg/l)
Amostra			174,7		149,2
Al₂(SO₄)₃ 140ppm	6,0	KFCP 604 – 1,00 ppm	26,8	50%	56,9
				100%	38,3
		KFPA 329 – 2,00 ppm	35,4	50%	40,3
				100%	107,3
		KFPN 174 – 2,00 ppm	43,6	50%	51,6
				100%	60,6
FeCl₃ 160ppm	9,0	KFCP 604 – 2,00 ppm	121,5	50%	56,8
				100%	55,6
		KFPA 329 – 2,00 ppm	87,9	50%	215
				100%	74,9
		KFPN 174 – 2,00 ppm	65,2	50%	92,6
				100%	72,9
Tanfloc SG 200ppm	9,0	KFCP 604 – 4,00 ppm	160,3	50%	127,6
				100%	191,6
		KFPA 329 – 2,00 ppm	143,2	50%	76,3
				100%	98,6
		KFPN 174 – 1,00 ppm	122,2	50%	83,3
				100%	122,9
KCL 112 300ppm	9,0	KFCP 604 – 2,00 ppm	154,3	50%	128,3
				100%	132,9
		KFPA 329 – 2,00 ppm	139,9	50%	112,6
				100%	229,3
		KFPN 174 – 2,00 ppm	149,9	50%	115,9
				100%	178,9
KCL 193 160ppm	8,0	KFCP 604 – 4,00 ppm	157,8	50%	126,9
				100%	228,6
		KFPA 329 – 2,00 ppm	134,4	50%	168,9
				100%	145,9
		KFPN 174 – 2,00 ppm	128,8	50%	148,65
				100%	130,32

4.1.3 Comparação com padrões de reúso

A fim de verificar a adequação aos padrões de reúso, os resultados foram comparados com as diretrizes da legislação americana U.S. E.P.A. - *Environmental Protection Agency* (2004).

Dentre todas as análises executadas a que apresentou melhores resultados foi o sulfato de alumínio com o auxiliar de coagulação catiônico (KFCP 604).

Levando em consideração a maior redução na DQO como parâmetro de referência, neste teste o jarro com 140 ppm de coagulante e 1 ppm de auxiliar de coagulação obteve a redução mais significativa. Com isso, optou-se fazer a análise de reúso para este jarro. O qual resultou em 10 Hazen para cor, 0,74 NTU para turbidez e 38,3 mg/l para DQO seguido de flotação e 26,8 quando seguido de sedimentação.

Comparando os resultados encontrados neste teste com os apresentados no Quadro 4.5 observou-se que a turbidez e cor atenderam as diretrizes para reúso em torres de resfriamento (Quadros 2.8). Porém o resultado de 38,3 mg/l para DQO pós flotação está acima do permitido (≤ 30 mg/l). O pH, turbidez e cor obtiveram resultados ainda melhores e estariam aptos a atender as quatro categorias propostas para reúso. (Quadros 2.3 a 2.8). Já na coagulação/floculação seguido de sedimentação a redução para uma DQO de 26,8 permite seu uso posterior em torres de resfriamento.

Os valores para coliformes totais e fecais não puderam ser comparados devido estes não terem sido analisados para esta tecnologia, uma vez que a coagulação-floculação não é efetiva na remoção destes parâmetros.

Deve-se alertar que, se levados em consideração todos os parâmetros conjuntamente, e não de forma isolada, o efluente tratado por coagulação/floculação não estaria apto a ser usado em nenhum dos quatro locais propostos para reúso devido ao excesso de sólidos no caso do ensaio seguido de flotação.

Apenas um caso do ensaio de coagulação/floculação seguido de coagulação estaria de acordo para o reúso em meio industrial (sulfato de alumínio + polímero catiônico).

Porém cabe ressaltar que antes de utilizar a indústria deve repensar seu uso devido aos problemas causados pela presença de alumínio, como problemas no sistema nervoso, que causam até mesmo o mal de Alzheimer (MERCÊ *et al.* 2008;

MERCÊ *et al.*, 2010).

Entretanto, a tecnologia da coagulação/floculação proposta é interessante por conseguir abaixar sensivelmente a DQO, cor e turbidez.

Supõe-se que dentro da indústria o efluente poderia ser utilizado para fins não potáveis, como lavagens de toras de madeira e de pisos. Para viabilizar o reúso desta tecnologia, poderia, ainda, ser recomendada uma revisão para o critério do SDT permitindo assim o uso deste efluente tratado por coagulação/floculação, uma vez que o tratamento físico-químico normalmente não é eficiente para a sua remoção como afirma Junior (2006).

4.2 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

4.2.1 Caracterização de matérias-primas

4.2.1.1 Cinza da queima da madeira

Para a caracterização inicial da cinza foi realizada análise de umidade da amostra pela diferença de massa, perda de água, durante a permanência em estufa a 100° C num período de 48 horas, resultando em 9,37% de umidade.

A cinza utilizada para a confecção dos corpos de prova foi analisada por DRX, FRX e MEV-EDS, e os resultados foram complementares, indicando uma mistura de óxidos de silício, de alumínio, de ferro e de cálcio, como mostram as Tabelas 4.1 e 4.2. A percentagem da Perda a Fogo (PF) foi 20,18%.

TABELA 4.1 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA A CINZA

Nome do composto	Fórmula Química
Quartzo	SiO ₂
Halite, potássio	K _{0,2} Na _{0,8} Cl

TABELA 4.2 – RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA A CINZA

Componentes	(%)
SiO ₂	53,0
Al ₂ O ₃	12,8
Fe ₂ O ₃	5,7
CaO	2,5
K ₂ O	1,6
P ₂ O ₅	1,6
TiO ₂	1,1
MgO	0,7
Na ₂ O	0,4
MnO	0,1
SO ₃	0,1
BaO	0,1
ZrO ₂	0,1
SrO	< 0,1
Rb ₂ O	< 0,1

Na Figura 4.1 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica da cinza a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura cristalina (quartzo).

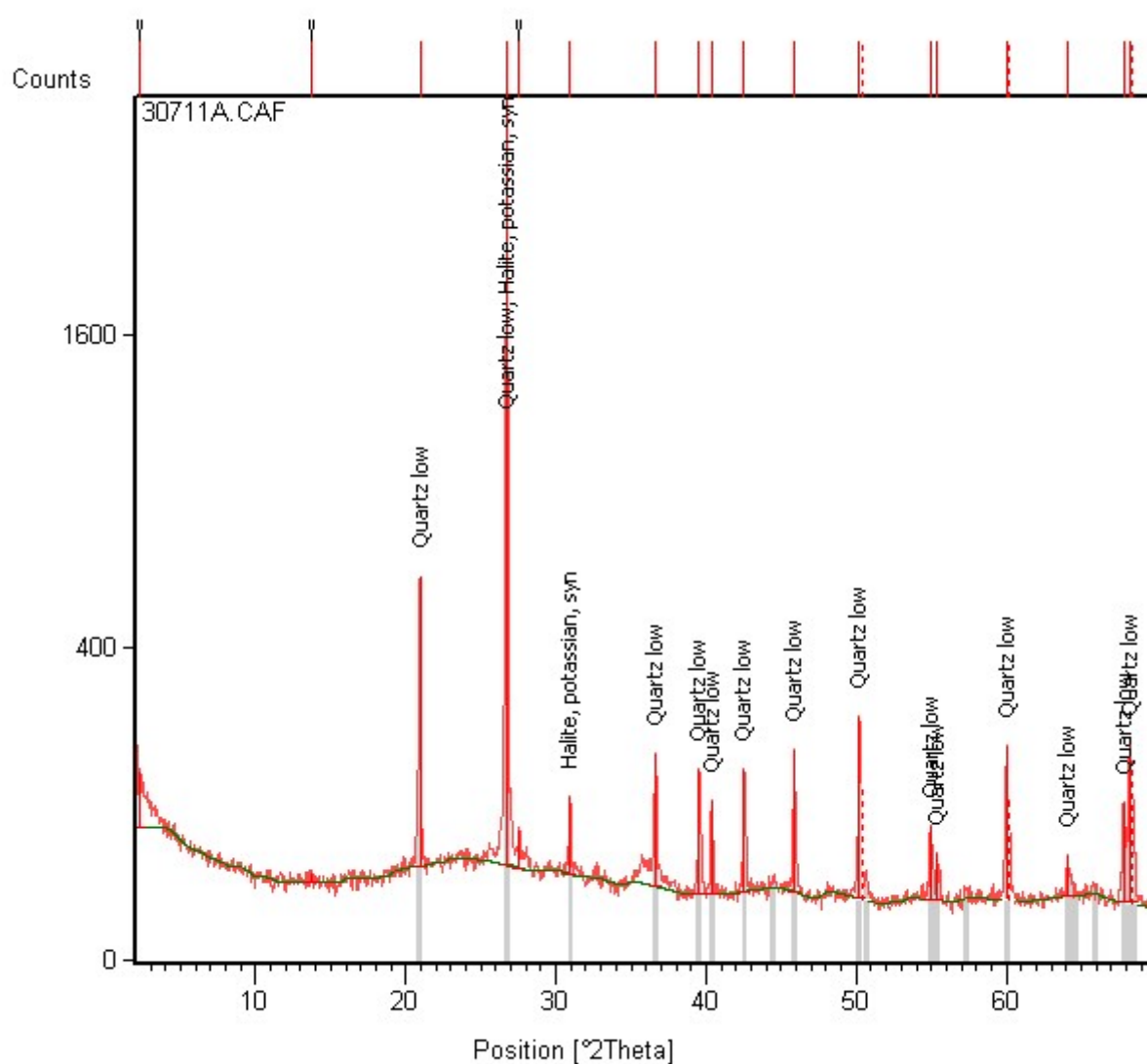


FIGURA 4.1 – DIFRATOGRAMA DA CINZA

Nas análises de MEV-EDS foi observada a composição morfológica da cinza, conforme a Figura 4.2.

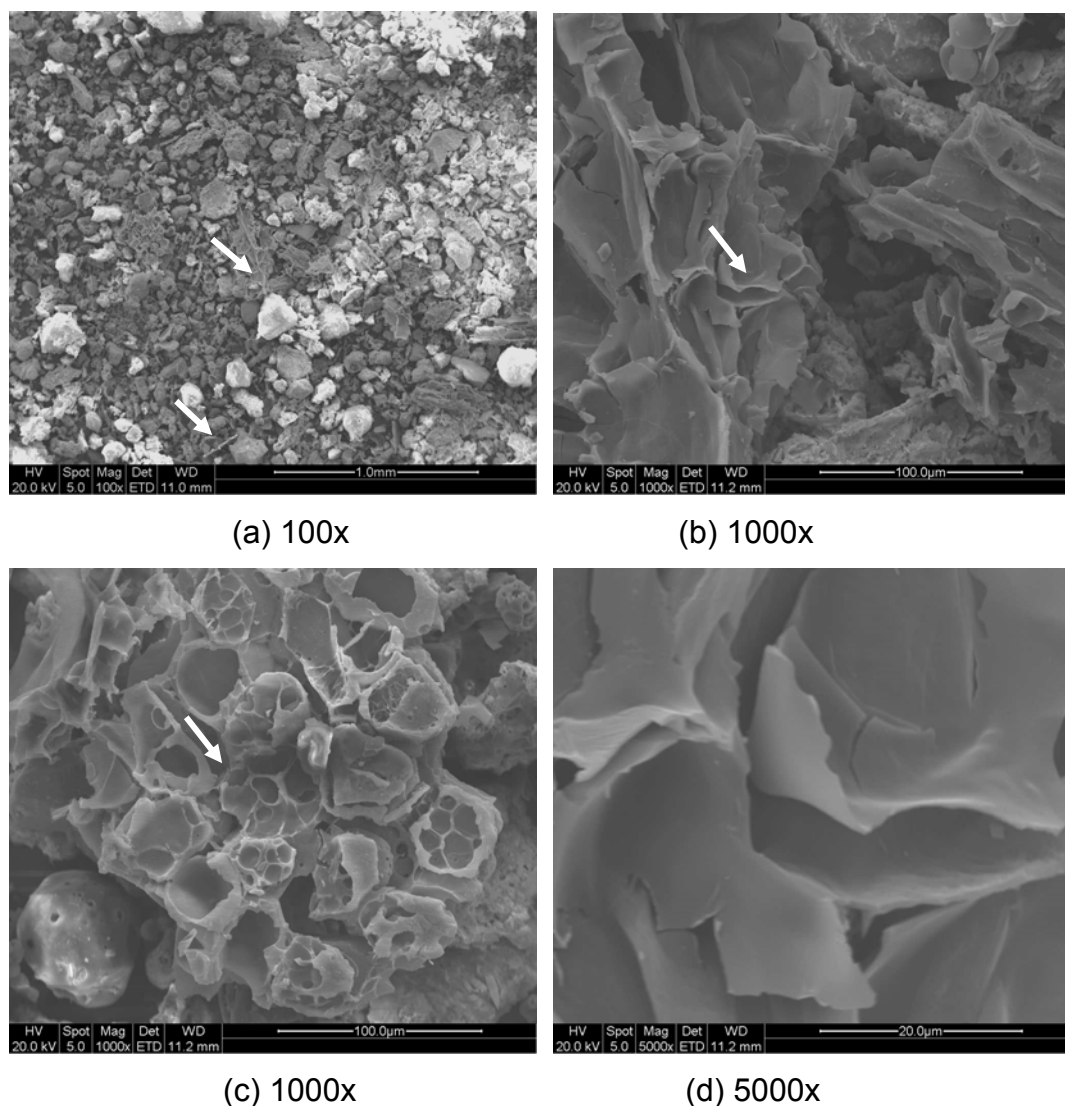


FIGURA 4.2 – MICROGRAFIAS DA CINZA (a) 100X, (b) E (c) 1000X E (d) 5000X

O resultado da aplicação da microscopia eletrônica de varredura permite observar que nas micrografias (a) e (b) (Figura 4.2), todas as partículas de cinza têm diferentes tamanhos e morfologia, além de evidenciar que as partículas não possuem ligação entre si. Esta grande diversidade entre as partículas revela uma alta porosidade do material por não haver ligação entre os componentes.

Com a magnificação das imagens (Figuras 4.2 c e d) é possível observar que não há uma interação maior entre as partículas. E na micrografia (c) se destaca as formas específicas encontradas também em materiais como a madeira, indicando que estas estruturas representam a madeira que não foi bem queimada ou que mesmo após sua queima a estrutura desta permanece. Estas estruturas se parecem

com folhas flexíveis que tornariam o material fraco quanto à resistência, e a porosidade pela falta de interação. Estas diferentes formas angulosas (c) e arredondadas, com espaçamentos estreitos (b) promovem uma grande influência química e mecânica. A diversidade de formas livres sem ligação umas com as outras e de tamanhos diferentes nos permite concluir que não há uma interação química significativa entre eles, caracterizando um material disforme.

Na área 1 da micrografia representada pela Figura 4.3 foi realizada a micro-análise química de EDS, seus resultados estão apresentados na Figura 4.4 e Tabela 4.3, confirmando os resultados da FRX, com elevada concentração de carbono.

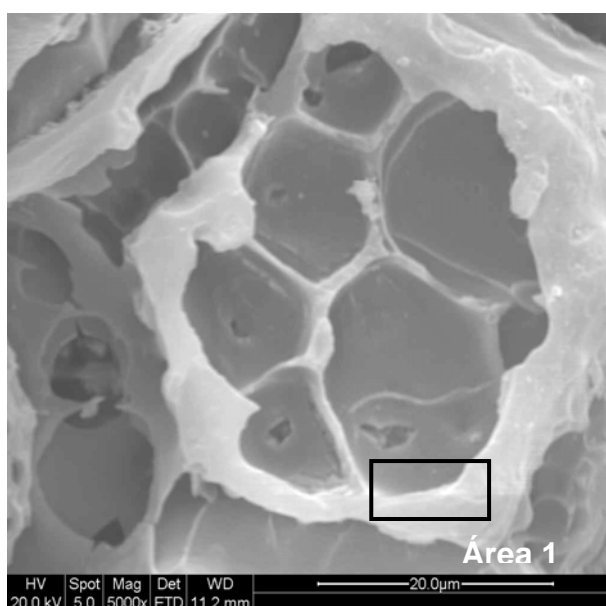


FIGURA 4.3 – MICROGRAFIA DA CINZA 5000X

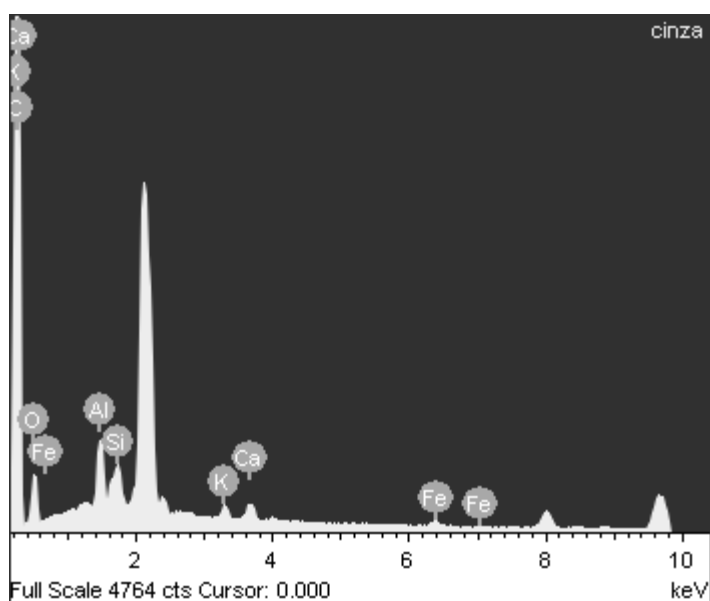


FIGURA 4.4 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DA CINZA

TABELA 4.3 – ANÁLISE DE EDS DA ÁREA GERAL DA MICROGRAFIA DA CINZA

	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe	Total
Área 1	79,70	15,28	2,00	0,79	0,64	0,88	0,72	100,00

Pela cinza ser resultado da queima da madeira já era esperado um alto teor de carbono na amostra, seguido de oxigênio e alumínio. Outro componente que não poderia faltar era o cálcio presente nesta cinza numa proporção de 0,88 %.

4.2.1.2 Lodo físico-químico de ETE

Para a caracterização inicial do lodo físico-químico, também foram realizadas análises de umidade. Através da diferença de massa, perda de água, após a permanência em estufa a 100° C num período de 48 horas, resultando em 73,47% de umidade.

E as análises de DRX da cinza indicaram a presença mineralógica de nitratine e aragonite (Tabela 4.4). A composição química foi apresentada pelas análises de FRX nas quais resultaram as seguintes proporções de 10,2% de Al_2O_3 e 3,7% de CaO , como mostra a Tabela 4.5.

Vale ressaltar que na composição do lodo físico-químico existem traços de outros óxidos como os de ferro, manganês e potássio, além dos que compõe a Tabela 4.5. A percentagem da Perda a Fogo (PF) foi 82,55%.

TABELA 4.4 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O LODO

Nome do composto	Fórmula Química
Nitratine	NaNO_3
Kamacite	(Fe, Ni)
Aragonite	CaCO_3

TABELA 4.5 – RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA O LODO

Componentes	(%)
Al_2O_3	10,2
CaO	3,7
P_2O_5	0,9
SiO_2	0,8
SO_3	0,4
MgO	0,4
Na_2O	0,3
Cl	0,3
Fe_2O_3	0,1
MnO	0,1
K_2O	0,1
SrO	< 0,1
TiO_2	< 0,1
ZnO	< 0,1

Na Figura 4.5 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica do lodo a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura contendo principalmente nitrato em sua composição.

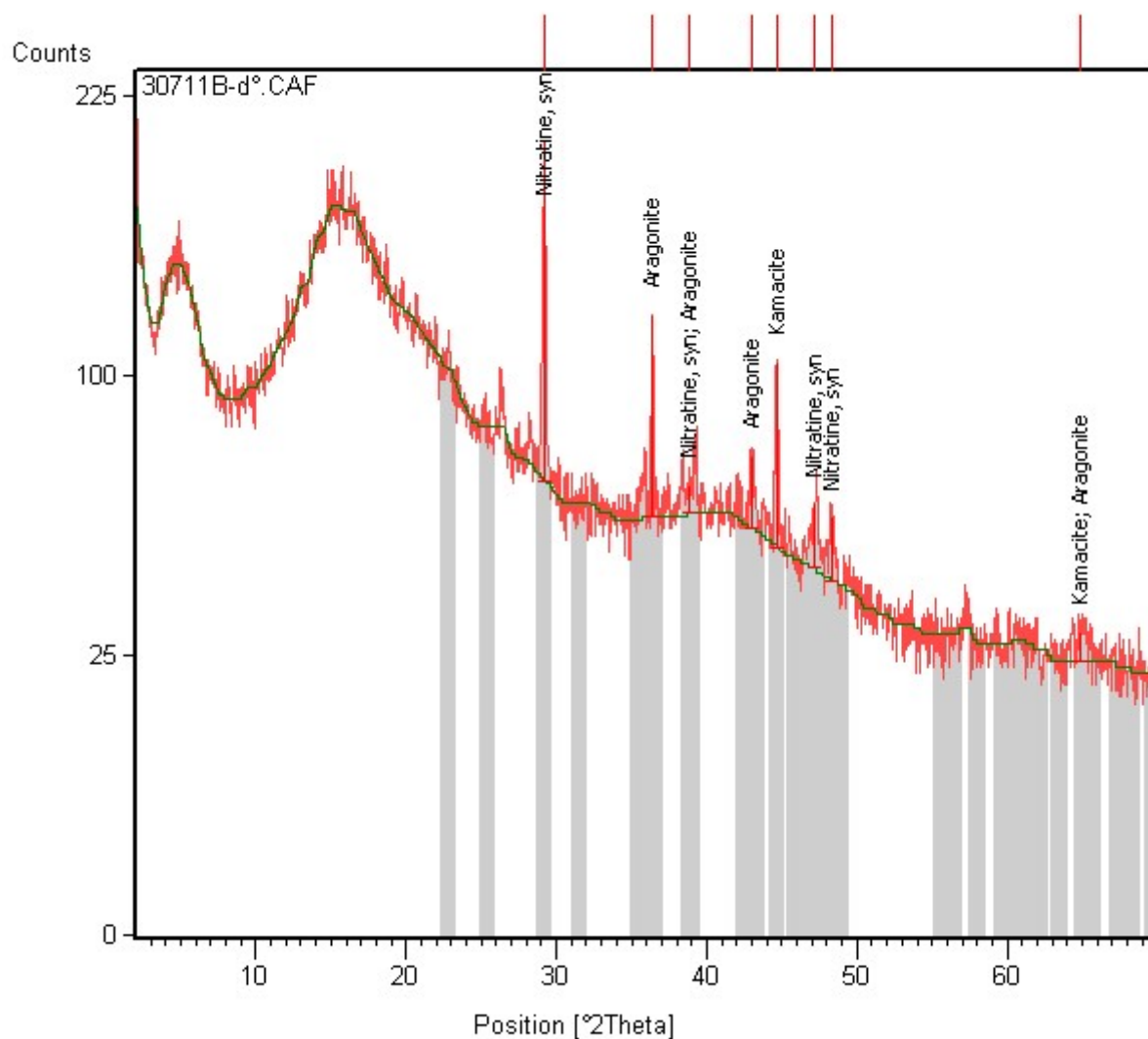


FIGURA 4.5 – DIFRATOGRAMA DO LODO

Nas análises de MEV-EDS foi observada a composição morfológica do lodo, conforme a Figura 4.6.

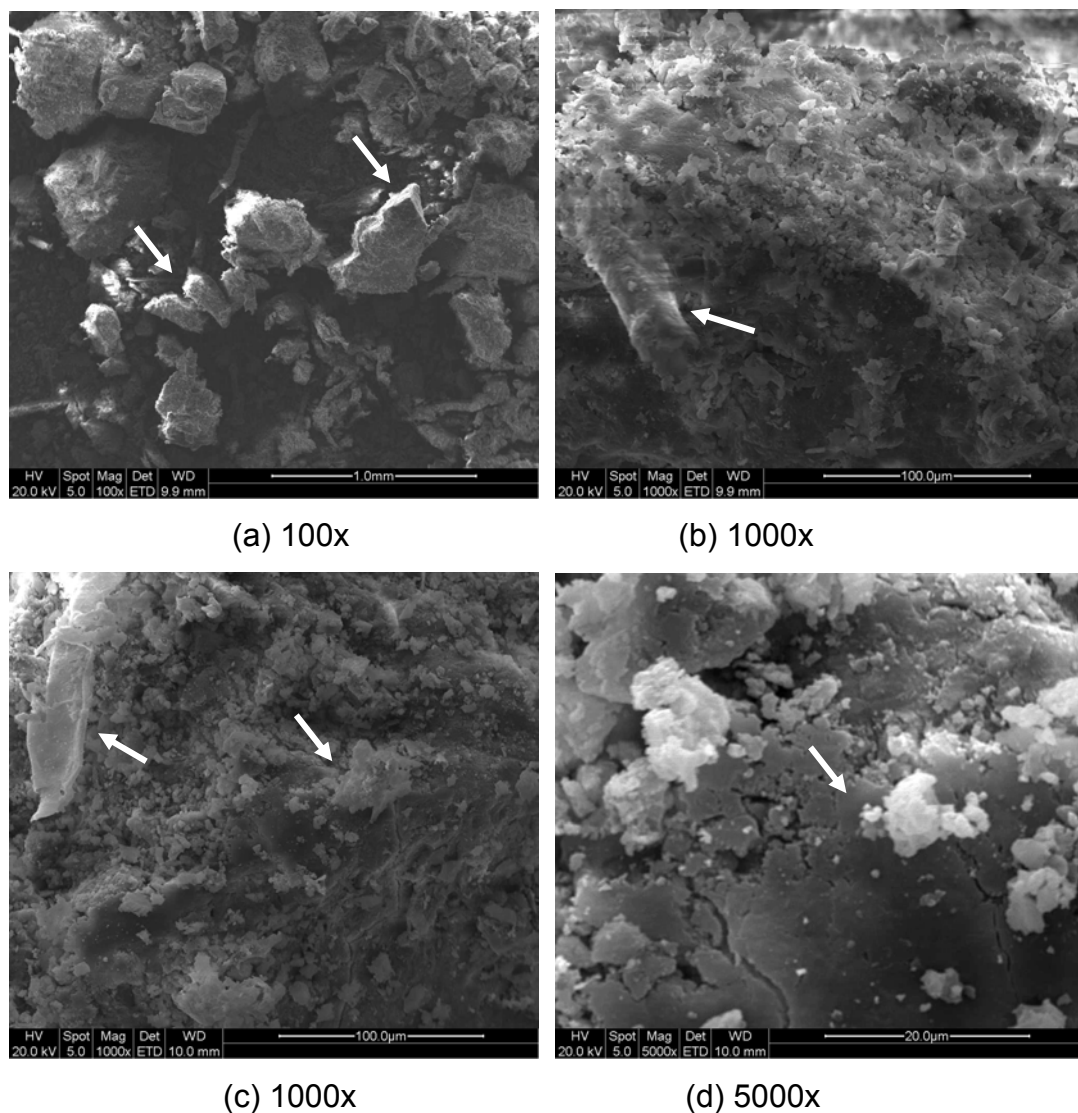


FIGURA 4.6 – MICROGRAFIAS DO LODO (a) 100X, (b) E (c) 1000X E (d) 5000X

Para o lodo foi verificado que há uma pequena interação entre suas partículas, uma vez que devido sua umidade há uma hidratação que promove a tendência dos conglomerados se reunirem e interagirem quimicamente entre si. Na micrografia (a) (Figura 4.6), se destacam partículas de lodo com diferentes tamanhos e morfologia, algumas até mesmo mais angulosas e arredondadas. Com a magnificação das imagens (Figuras 4.6 c e d) é possível verificar uma interação química inicial já existente no material, porém sua superfície ainda é irregular devido às partículas no meio. A característica é de um material disforme, pois tanto na área geral como na magnificação, percebe-se a mistura de micropartículas com diferentes tamanhos e morfologias.

Na área 2 da micrografia representada pela Figura 4.7 foi realizada a micro-análise química de EDS, seus resultados estão apresentados na Figura 4.8 e Tabela 4.6, confirmando os resultados da FRX, tendo apresentado elevada concentração de carbono, cálcio e alumínio.

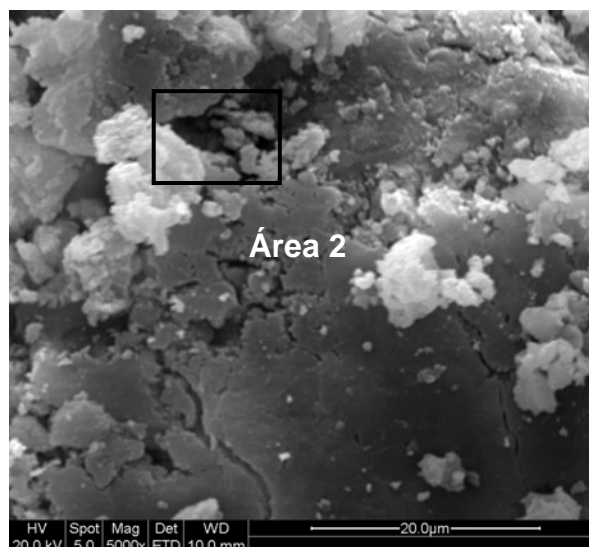


FIGURA 4.7 – MICROGRAFIA DO LODO 5000X

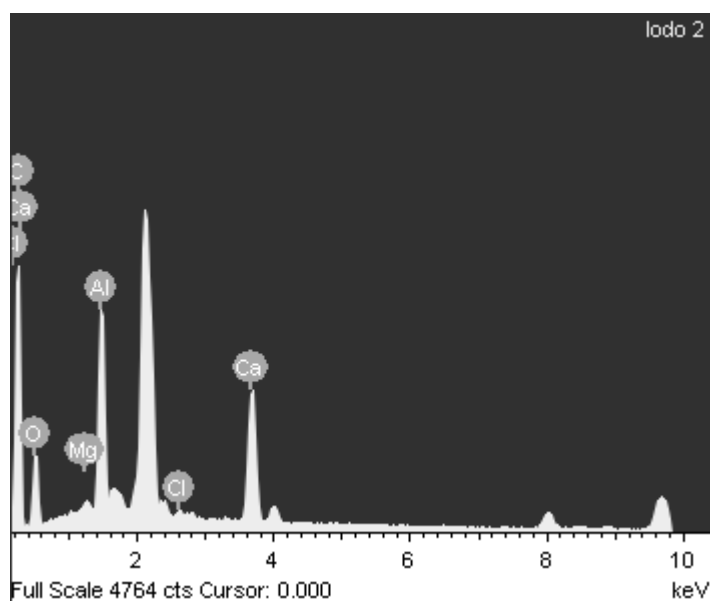


FIGURA 4.8 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DO LODO

TABELA 4.6 – ANÁLISE DE EDS DA ÁREA GERAL DA MICROGRAFIA DO LODO

	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Total
Área 2	58,35	26,63	0,65	0,43	7,41	1,75	1,35	9,77	100,00

4.2.1.3 Resíduo da produção de cal

A fábrica de cal localizada na região de Colombo – PR forneceu o resíduo da produção da cal (RPC) - a cal mal queimada que servirá nestes experimentos como ligante nas misturas. Uma das exigências químicas adotadas para aplicação da cal como ligante na construção civil conforme a NBR 6453 (2003) é apresentar o teor mínimo de óxidos totais na base não volátil ($\text{CaO} + \text{MgO}$) de 88%. Este teor foi fixado tendo como base matérias primas nacionais. O teor de anidrido carbônico (CO_2), sendo fixado para a cal virgem especial e para a cal comum, teores máximos de 6 e 12% respectivamente. O RPC usado neste trabalho apresentou um teor de 23,6% de CO_2 , caracterizando como resíduo de produção de cal.

A cal utilizada para os corpos de prova foi analisada por DRX, FRX e os resultados indicam que ela não é pura, pois é constituída pela mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio (periclase), dolomita, portlandita e quartzo, como indicado na Tabela 4.7 e Tabela 4.8.

TABELA 4.7 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA A CAL

Nome do composto	Fórmula Química
Óxido de cálcio	CaO
Periclase	MgO
Portlandita	Ca(OH)_2
Quartzo	SiO_2
Dolomita	$\text{CaMg(CO}_3)_2$

TABELA 4.8 – RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA A CAL

Componentes	(%)
CaO	54,9
MgO	36,4
SiO_2	7,6
Al_2O_3	0,5
Fe_2O_3	0,3
K_2O	0,1
MnO	0,1
SO_3	0,1

Na análise de MEV foi observada a composição morfológica da cal residual, conforme a Figura 4.9

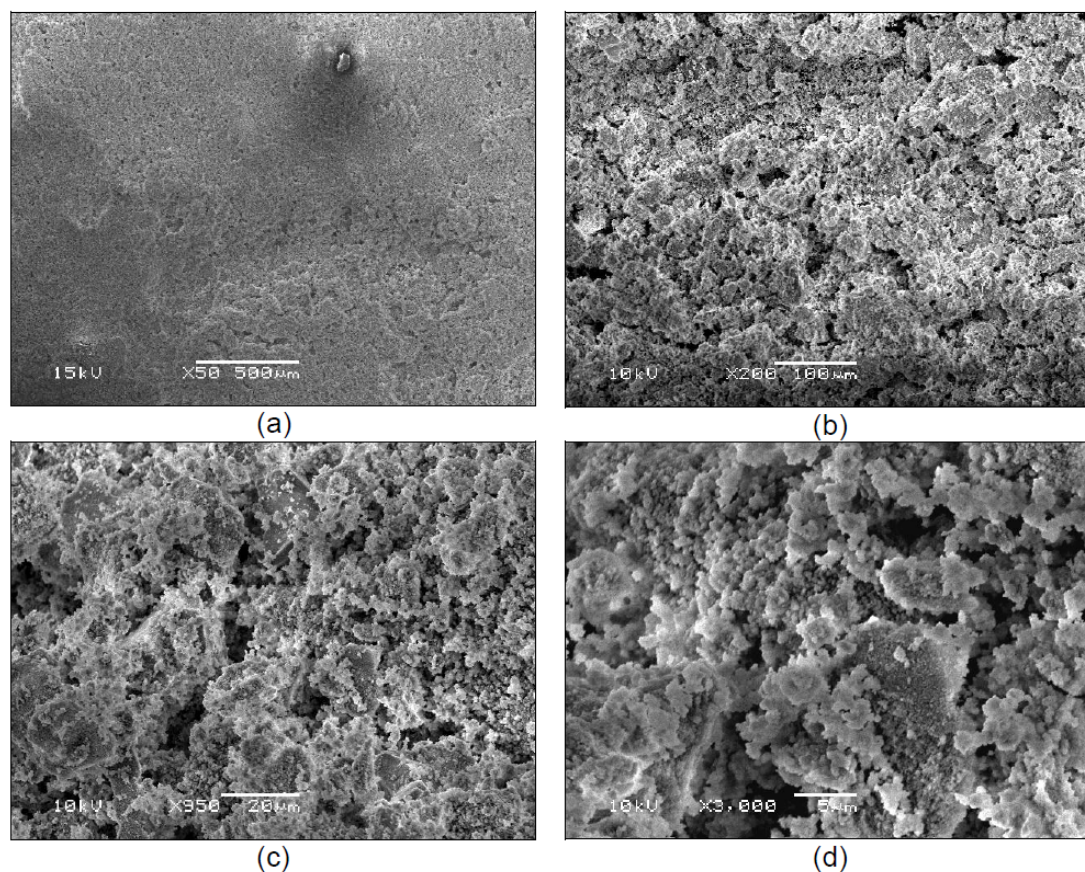


FIGURA 4.9 – MICROGRAFIAS DA CAL RESIDUAL (a) 50X, (b) 200X, (c) 950X E (d) 3000X

Na Figura 4.9 (a), pode-se observar que a superfície é bastante lisa, uniforme, sem elevações, com uma considerável rede de poros irregulares, já na ampliação de 200x, Figura 4.9 (b), estes poros são mais visíveis e suas formas irregulares. As partículas não possuem formas cristalinas muito visíveis, com extremidades assimétricas. Estas formas assimétricas são mais visíveis nas Figuras 4.9 (c) e (d). Na ampliação de 3000x, todas as formações são similares a formações amorfas.

Provavelmente, por isso, nos difratogramas de Raios X da mistura seca não são visíveis picos de carbonatos. Entretanto, não se pode afirmar, com certeza, a não existência de formas microcristalinas internas a estas formações amorfas. Uma possível justificativa, é que os resíduos de produção de cal são dispostos a céu aberto e são hidratados pelas chuvas e umidade do ar, transformando-se em

Ca(OH)_2 e pela ação do CO_2 do ar, transformando-se em CaCO_3 . Porém, a sensibilidade, em torno de 5%, do método de DRX não permite a identificação dos picos destes minerais, podendo existir outros minerais com estruturas cristalinas, como por exemplo, a calcita e na dolomita.

4.2.2 Confeção e caracterização dos corpos de prova

Foram definidas sete composições, com variação de 30 – 45 % de lodo físico-químico da ETE, agregado às cinzas e a cal residual, conforme visto na Tabela 3.1. A confecção dos corpos de prova (CP) foi realizada no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LTA), do departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Para cada uma das 7 composições foram confeccionadas 45 peças. As idades trabalhadas foram de 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias, perfazendo um total de 315 CP's nas dimensões aproximadas de 20 mm X 20 mm (Figura 4.10).



FIGURA 4.10 – CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS

Segundo Neville (1997), a maioria das características desejáveis de materiais de concreto está relacionada com a resistência. Silva (1992) destaca a importância da relação água/concreto, pois a maioria dos defeitos relacionados à resistência do concreto é decorrente do excesso de água presente. Segundo Lima (1999), concretos com reciclado apresentam, em geral, resistência a compressão menor ou igual à dos concretos convencionais para consumos de cimento médios ou altos. Para baixos consumos, podem apresentar resistência maior que os convencionais. A diferença entre a resistência à compressão de concretos com reciclado e

convencionais varia com o tipo de reciclado, sua quantidade e com o consumo de cimento. Neste caso em questão, não houve adição de cimento, porém a quantidade de lodo e cinza na composição variou (Tabela 3.1).

A etapa de reaproveitamento exigiu a caracterização do corpo de prova confeccionado, para avaliar as composições químicas, mineralógicas e morfológicas, assim como as características mecânicas, descritas a seguir.

4.2.2.1 Análise de resistência à compressão

Os corpos de prova foram prensados até o seu rompimento avaliando sua resistência à compressão como verificado na Figura 4.11

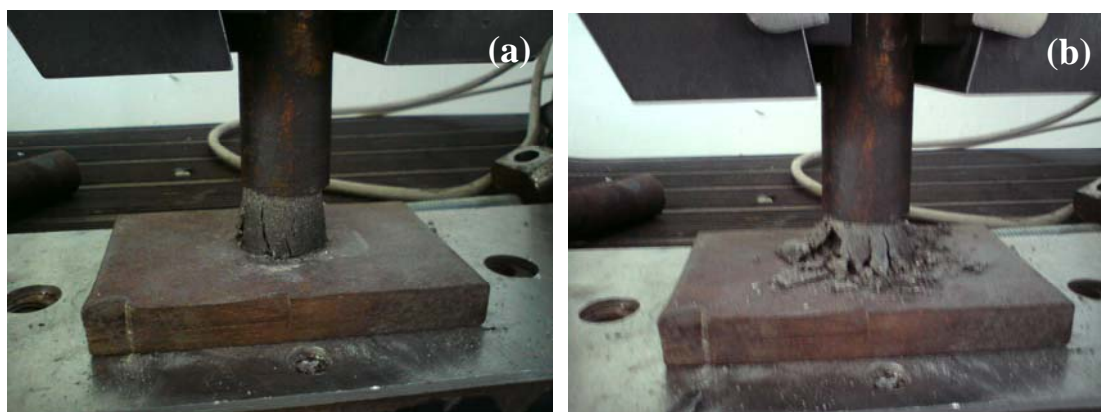


FIGURA 4.11 – CORPO DE PROVA (a) DURANTE E (b) NO FINAL DE SUA COMPRESSÃO

Os resultados da análise de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 4.9.

TABELA 4.9 – MUDANÇA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DURANTE DIAS DE CURA

Composições (%)				Resistência (MPa) após						
N	Lodo	Cinza	Cal	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias	180 dias
1	45	45	10	5,09 ± 0,54	4,25 ± 0,29	5,50 ± 0,44	5,32 ± 0,72	5,17 ± 0,38	5,25 ± 0,43	5,56 ± 0,42
2	40	45	15	3,90 ± 0,60	4,17 ± 0,98	5,26 ± 1,06	5,40 ± 0,65	6,08 ± 1,10	5,87 ± 0,15	5,96 ± 0,30
3	35	50	15	2,20 ± 0,40	2,97 ± 0,28	3,05 ± 0,43	3,70 ± 0,89	3,66 ± 0,58	3,09 ± 0,05	3,85 ± 0,58
4	30	55	15	1,95 ± 0,16	2,93 ± 0,46	3,38 ± 0,32	3,48 ± 0,59	3,35 ± 0,32	3,42 ± 0,13	3,32 ± 0,47
5	40	40	20	5,25 ± 0,89	6,13 ± 0,72	7,18 ± 0,44	6,96 ± 0,97	7,95 ± 1,67	8,37 ± 2,14	8,77 ± 0,11
6	35	45	20	3,75 ± 0,28	4,86 ± 0,48	5,62 ± 0,40	5,10 ± 1,42	6,14 ± 0,65	6,04 ± 0,93	5,07 ± 0,18
7	30	50	20	1,62 ± 0,35	2,30 ± 0,52	3,02 ± 0,56	3,13 ± 0,57	3,55 ± 0,45	3,87 ± 0,55	3,37 ± 0,21

Nota: Conforme a NBR 7171 (1992) a resistência uniaxial dos blocos cerâmicos deve ser as seguintes:

Classe 15 = 1,5 < 2,5 MPa, Classe 25 = 2,5 < 4,5 MPa.

Conforme a NBR 7170 (1983) a resistência uniaxial dos tijolos maciços deve ser as seguintes:

Classe A < 2,5 MPa; Classe B 2,5 < 4,0 MPa; Classe C > 4,0 MPa.

A resistência à compressão está diretamente relacionada à sua estrutura interna e com estes valores pode-se verificar seu respectivo desempenho mecânico e consequente durabilidade.

Comparando os dados da Tabela 4.9 com demandas de NBR 7170 e 7171 pode-se notar que os valores de resistências dos materiais desenvolvidos estão em conformidade com as normas citadas e ultrapassam muitas vezes o limite máximo indicado. Para facilitar a visualização dos resultados apresentados na tabela, os dados foram plotados na Figuras 4.12.

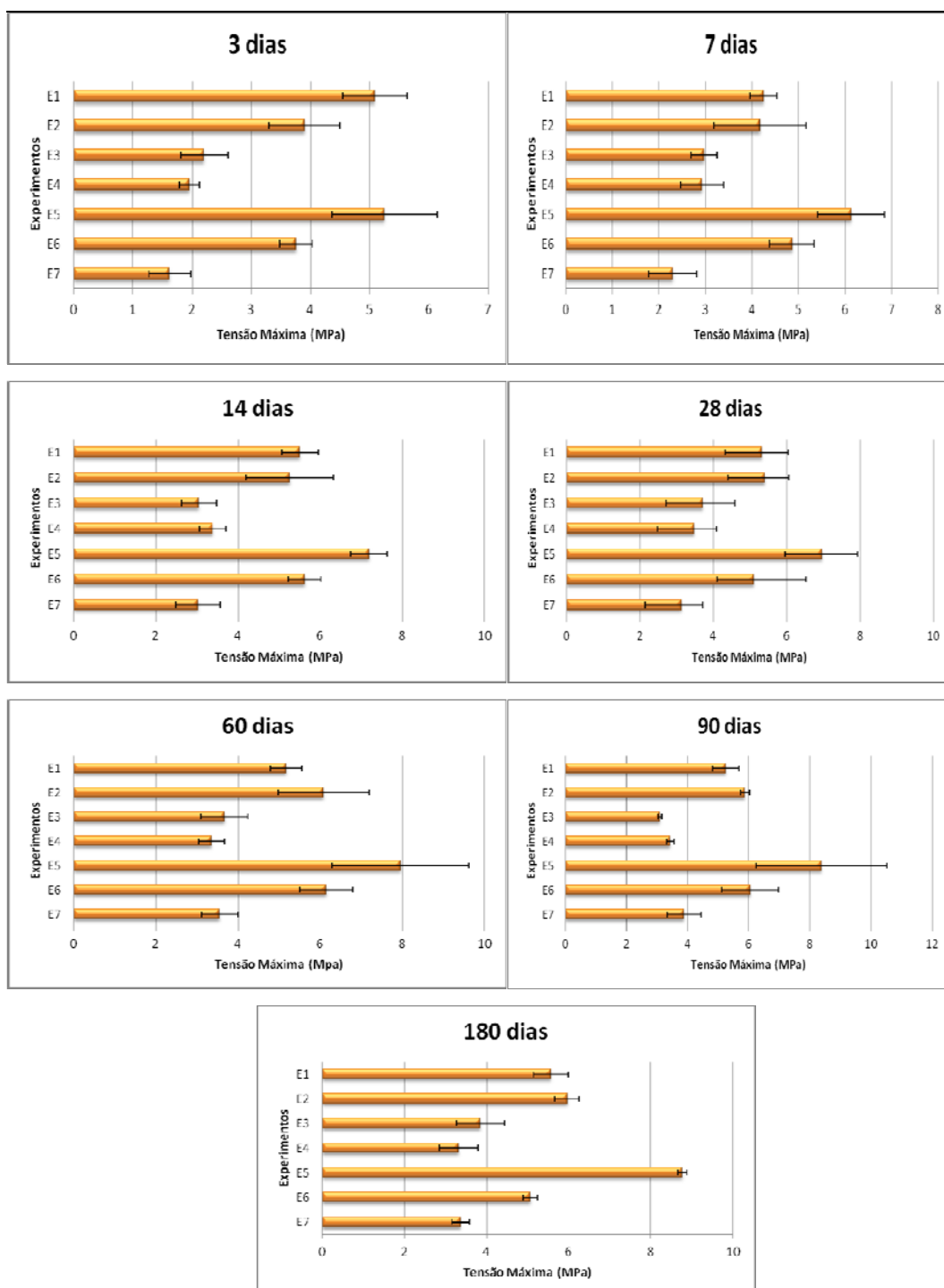


FIGURA 4.12 – RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA EM DIFERENTES IDADES DE CURA

Pode-se notar que em todas as composições, gradativamente suas resistências a compressão foram aumentando. Isto indica que com o passar do tempo ocorre uma maior interação química dos componentes, reduzindo o volume de espaços vazios que deixavam o material mais frágil. Mas o destaque maior foi para a composição 5 cujas resistências em todos os dias de cura estiveram maior

que as dos outros, com valores que chegaram até mesmo a 8,77 MPa em 180 dias. A composição 5 já se mostrou mais resistente logo de início das análises, e por isso foi escolhida como a melhor proporção de mistura de resíduos e a que seria analisada pelas demais técnicas propostas no estudo (DRX e MEV-EDS).

Solyon em seu trabalho utilizando lodo físico-químico e cinza da queima de madeira de uma indústria de tintas e impressão de papéis decorativos, juntamente com resíduo da construção de cal (RPC), alcançou resistências à compressão uniaxial de até 7,28 MPa na idade de 90 dias, na proporção 55:30:15 dos resíduos acima citados, que é menor ao valor máximo (8,37 MPa) obtido nesse trabalho.

4.2.2.2 Análise de absorção e resistência à água

Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão e resistência à água do material no 60°, 90° e no 180° dia estão apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12.

Para todas as composições foram calculadas seus respectivos coeficientes de absorção (C_a) e de resistência a água (C_{ra}). O C_a é calculado pela diferença entre as massas dos corpos-de-prova secos e úmidos após a submersão de 24h em água. O C_{ra} é calculado pela razão entre as resistências do corpo de prova úmido pelo seco após sua compressão. Para cada análise foram utilizados 5 CPs a fim de se ter uma média representativa.

TABELA 4.10 – ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA À ÁGUA NO 60° DIA

N	Composições, %			Resistência à água (MPa) no 60° dia			**Coeficiente de absorção (C_a)
	Lodo	Cinza	Cal	R amostras secas (R_s)	R amostras úmidas (R_u)	*Coeficiente de resistência à água (C_{ra})	
1	45	45	10	5,17 ± 0,38	4,23 ± 0,56	0,82	0,97 ± 0,06
2	40	45	15	6,08 ± 1,10	4,18 ± 0,64	0,69	0,77 ± 0,70
3	35	50		3,66 ± 0,58	2,24 ± 0,52	0,61	1,38 ± 0,08
4	30	55		3,35 ± 0,32	2,41 ± 0,41	0,72	1,61 ± 0,10
5	40	40	20	7,95 ± 1,67	4,76 ± 0,27	0,60	0,99 ± 0,08
6	35	45		6,14 ± 0,65	4,30 ± 0,34	0,70	1,03 ± 0,09
7	30	50		3,55 ± 3,55	2,57 ± 0,38	0,72	1,56 ± 0,10

*Coeficiente de resistência à água (C_{ra}) = R_u/R_s

**Coeficiente de absorção à água (C_a) = $m_u - m_s$

TABELA 4.11 – ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA À ÁGUA NO 90º DIA

N	Composições, %			Resistência à água (MPa) no 90º dia			**Coeficiente de absorção (C_a)
	Lodo	Cinza	Cal	R amostras secas (R_s)	R amostras úmidas (R_u)	*Coeficiente de resistência à água (C_{ra})	
1	45	45	10	$5,25 \pm 0,43$	$4,03 \pm 0,31$	0,77	$1,19 \pm 0,20$
2	40	45	15	$5,87 \pm 0,15$	$3,99 \pm 0,81$	0,68	$0,86 \pm 0,06$
3	35	50		$3,09 \pm 0,05$	$2,62 \pm 0,67$	0,85	$1,45 \pm 0,18$
4	30	55		$3,42 \pm 0,13$	$2,56 \pm 0,34$	0,75	$1,83 \pm 0,06$
5	40	40	20	$8,37 \pm 2,14$	$5,22 \pm 0,86$	0,62	$1,09 \pm 0,12$
6	35	45		$6,04 \pm 0,93$	$4,45 \pm 0,62$	0,74	$1,42 \pm 0,18$
7	30	50		$3,87 \pm 0,55$	$2,41 \pm 0,23$	0,62	$1,65 \pm 0,05$

*Coeficiente de resistência à água (C_{ra}) = R_u/R_s

**Coeficiente de absorção à água (C_a) = $m_u - m_s$

TABELA 4.12 – ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA À ÁGUA NO 180º DIA

N	Composições, %			Resistência à água (MPa) no 180º dia			**Coeficiente de absorção (C_a)
	Lodo	Cinza	Cal	R amostras secas (R_s)	R amostras úmidas (R_u)	*Coeficiente de resistência à água (C_{ra})	
1	45	45	10	$5,56 \pm 0,42$	$3,96 \pm 0,42$	0,71	$1,23 \pm 0,09$
2	40	45	15	$5,96 \pm 0,30$	$4,82 \pm 0,43$	0,81	$0,80 \pm 0,08$
3	35	50		$3,85 \pm 0,58$	$2,42 \pm 0,25$	0,63	$1,55 \pm 0,12$
4	30	55		$3,32 \pm 0,47$	$2,63 \pm 1,01$	0,79	$1,73 \pm 0,13$
5	40	40	20	$8,77 \pm 0,11$	$5,35 \pm 0,25$	0,61	$1,13 \pm 0,10$
6	35	45		$5,07 \pm 0,18$	$4,45 \pm 0,10$	0,88	$1,58 \pm 0,07$
7	30	50		$3,37 \pm 0,21$	$2,20 \pm 0,34$	0,65	$1,92 \pm 0,15$

*Coeficiente de resistência à água (C_{ra}) = R_u/R_s

**Coeficiente de absorção à água (C_a) = $m_u - m_s$

Os valores encontrados para a resistência à água em 60 dias, foram entre 2,24 a 4,76 MPa, com coeficiente de resistência à água (C_{ra}) entre 0,60 a 0,82. Para o 90º dia foram obtidos valores de resistência 2,41 e 5,22 MPa, com C_{ra} entre 0,62 e 0,85. E para 180 dias estes valores estiverem entre 0,63 e 0,88 para resistência à água, e 0,80 e 1,92 para o coeficiente de resistência à água.

Apesar dos valores do C_{ra} entre 60 e 90 dias se manterem praticamente constantes para a maioria das composições, houve um aumento do mesmo para 180 dias de cura. A composição 3 se destaca por apresentar um maior progresso no seu C_{ra} que foi de 0,61 para 0,85. Enquanto que a composição 7 teve seu C_{ra} diminuído de 0,72 para 0,62. Para a composição 1 também foi verificado uma queda na resistência de 0,82 para 0,77.

Segundo Petrucci (1993), a influência dos agregados miúdos na resistência é devida a granulometria, sendo que o agregado graúdo influencia em função de sua forma e textura do grão. No caso dos agregados miúdos, quanto mais finos, mais superfícies específicas terão, exigindo assim, uma maior quantidade de água para molhar os grãos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência.

Van Vlack (1973) afirma que a resistência mecânica de um material e se comporta inversamente proporcional com a absorção de água. Isto porque, a absorção de água tem relação direta com a porosidade e seu tamanho de grão; em outras palavras, uma maior resistência mecânica é obtida quando há simultaneamente baixa porosidade e pequeno tamanho de grão. Todavia, deve-se limitar, o tanto quanto possível, a porosidade do material, uma vez que na tentativa de baixá-la pode-se provocar uma deformação.

O que se busca são materiais mais resistentes mecanicamente e com baixas absorções de água, o que lhe dá um incremento técnico e comercial (SILVA, 2005).

Desta forma analisando as Tabelas 4.10 e 4.11 e 4.12 nota-se que a cinza responde negativamente para a resistência uma vez que quanto maior sua proporção na mistura menor foram os valores de resistência obtidos. Já o lodo responde positivamente sobre a resistência quanto maior sua proporção no meio, pois sua umidade hidrata a mistura, fazendo com que haja uma maior interação entre os componentes com conseqüente aumento da resistência. O maior teor de ligante (cal) deveria aumentar a resistência à água.

Para quase todas as misturas o coeficiente de absorção de água (C_a) aumenta com o crescimento do teor de cinza, e variou entre 0,77 e 1,61 no 60° dia de cura; e entre 0,86 a 1,65 no 90° dia de cura.

Cabe ressaltar que apesar da composição 5 ter apresentado melhores valores para a resistência à compressão uniaxial o mesmo não foi verificado quanto à resistência a água, nesta a qual os melhores resultados foram a composição 1 no 60° dia; composição 3 no 90° dia; e a composição 6 no 180° dia.

Solyon (2009) em seu trabalho utilizando lodo físico-químico e cinza da queima de madeira de uma indústria de tintas e impressão de papéis decorativos, juntamente com resíduo da construção de cal (RPC), obteve valores de resistência à água entre 2,43 a 3,02 MPa, com coeficiente de resistência de água variando entre 0,75 – 0,83, na idade de 90 dias.

Os valores obtidos de resistência a água em 90 dias nesse trabalho variaram de 2,41 – 5,22, estando em mesmo limite inferior porém ultrapassando o limite superior alcançado pelos materiais de Solyon (2009). Pode-se verificar que os valores de coeficiente de absorção verificado neste trabalho (0,52 – 0,85) tem limite inferior mais baixo porém limite superior muito próximo ao verificado por Solyon (2009).

Porém a maior diferença dos valores resultantes neste trabalho e no de Solyon (2009) é a absorção de água em 90 dias, uma vez que ela alcançou até 8% e aqui o maior coeficiente é de 1,83 %.

4.2.2.3 Análise de Difractometria de Raios X

Sabe-se que a mudança de estrutura interna ocorrerá de maneira similar em todas as composições, porém pelos corpos de prova da composição 5 apresentarem melhores resultados de resistência à compressão, estes foram pulverizados no moinho de tungstênio para as análises de DRX da mistura seca e após o tempo de cura de 3, 14, 60 e 180 dias.

Os difratogramas fornecidos pelo software são apresentados nas Figuras a seguir. Na Tabela 4.13 e Figura 4.13 apresenta-se os resultados para a mistura seca dos matérias (cinza, lodo físico-químico e cal).

TABELA 4.13 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA A MISTURA SECA

Nome do composto	Fórmula Química
Quartzo	SiO ₂
Portlandite	Ca(OH) ₂
Periclase	MgO
Calcite	CaCO ₃
Grafite	C

A presença de calcite é provavelmente devido ao cálcio mal queimado e o grafite também está relacionado à queima, estes devido à presença da cinza na mistura seca.

Na Figura 4.13 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica da mistura seca a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura cristalina (quartzo).

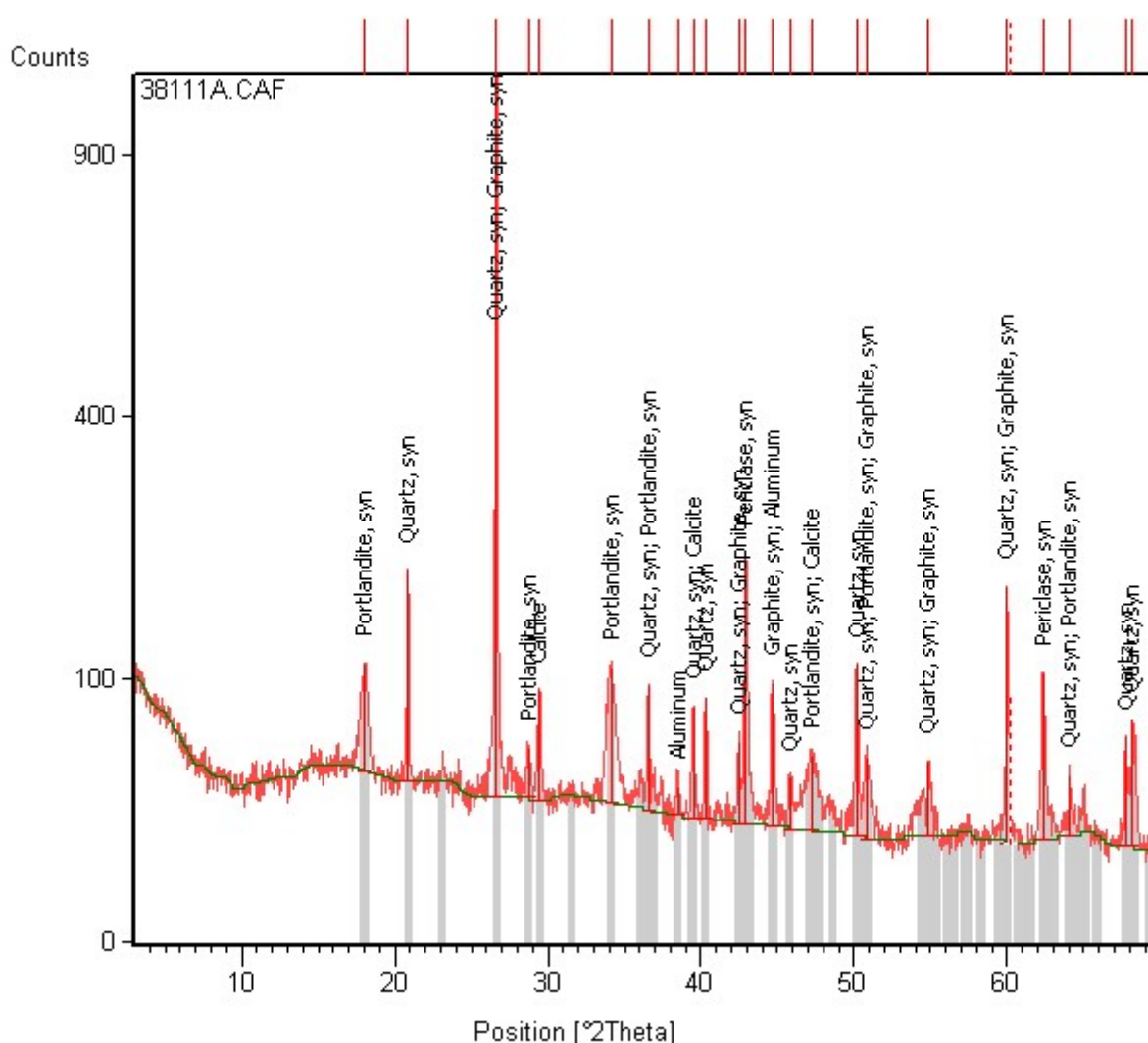


FIGURA 4.13 – DIFRATOGRAMA DA MISTURA SECA DA COMPOSIÇÃO 5

Os resultados da FRX e da DRX foram completos indicando a forte presença de portlandite e quartzo na mistura seca.

O DRX para o corpo de prova de 3 dias está representado pelas Tabela 4.14, e pela Figura 4.14. Porém destaca-se a formação de novos compostos como a cristobalite, kornepurine e tobermorite indicando que mesmo em apenas 3 dias já se inicia um processo de interação entre os componentes.

TABELA 4.14 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 3 DIAS

Nome do composto	Fórmula Química
Quartzo	SiO_2
Portlandite	Ca(OH)_2
Periclase	MgO
Calcite	CaCO_3
Grafite	C
Kornerupine	$\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si,Al,B})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$
Tobermorite	$(\text{CaO})_x\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Na Figura 4.14 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica do corpo de prova com 3 dias de cura a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura cristalina (quartzo).

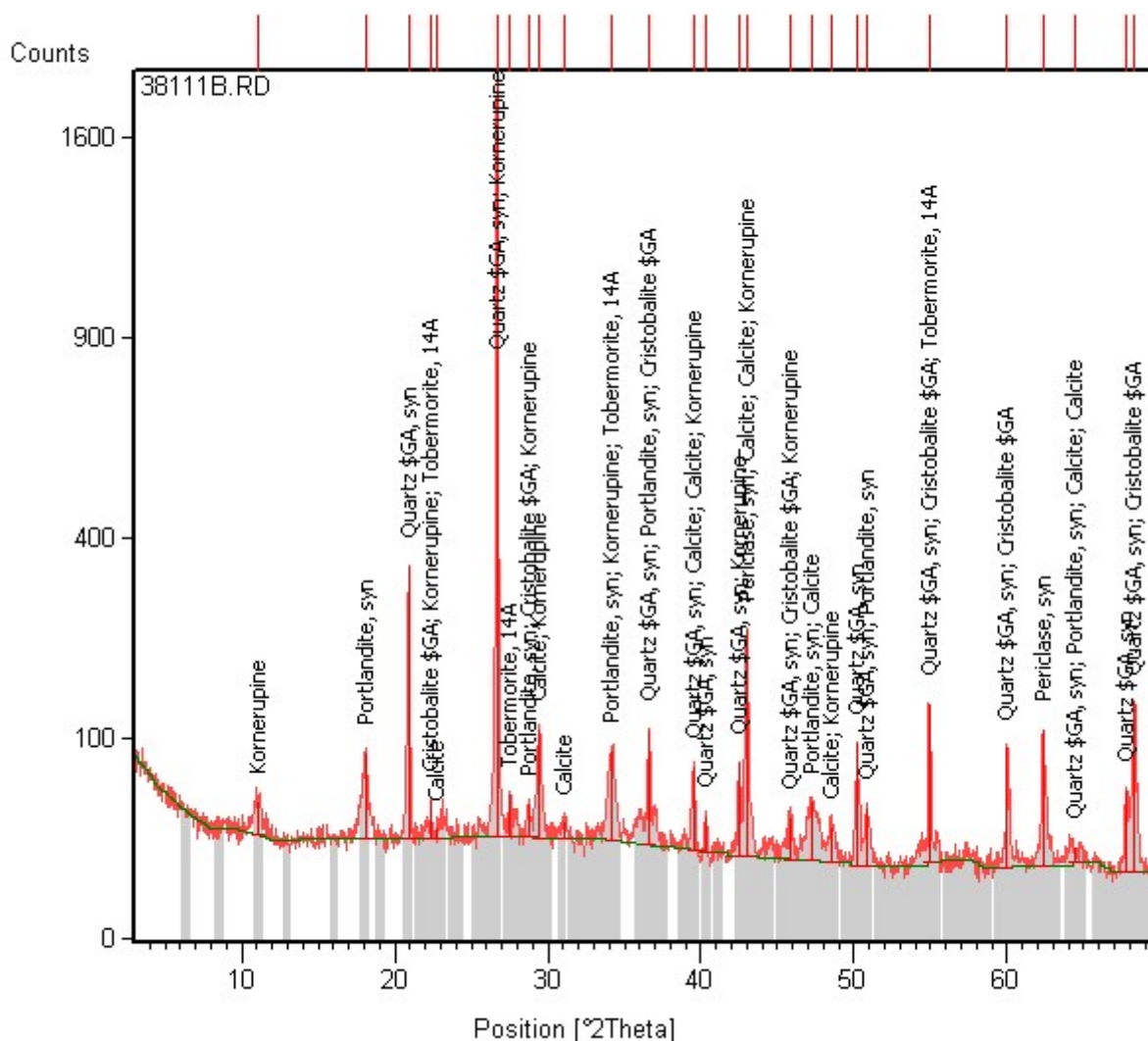


FIGURA 4.14 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 3 DIAS DE CURA

O DRX para o corpo de prova de 14 dias está representado pela Tabela 4.15 e pela Figura 4.15.

Na Figura 4.15 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica do corpo de prova com 14 dias de cura a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura cristalina (quartzo). Porém já com 14 dias o diferencial é o aparecimento da estrutura mineralógica periclase.

TABELA 4.15 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 14 DIAS

Nome do composto	Fórmula Química
Quartzo	SiO_2
Portlandite	Ca(OH)_2
Periclase	MgO
Calcite	CaCO_3
Grafite	C
Kornerupine	$\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si,Al,B})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$
Tobermorite	$(\text{CaO})_x\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

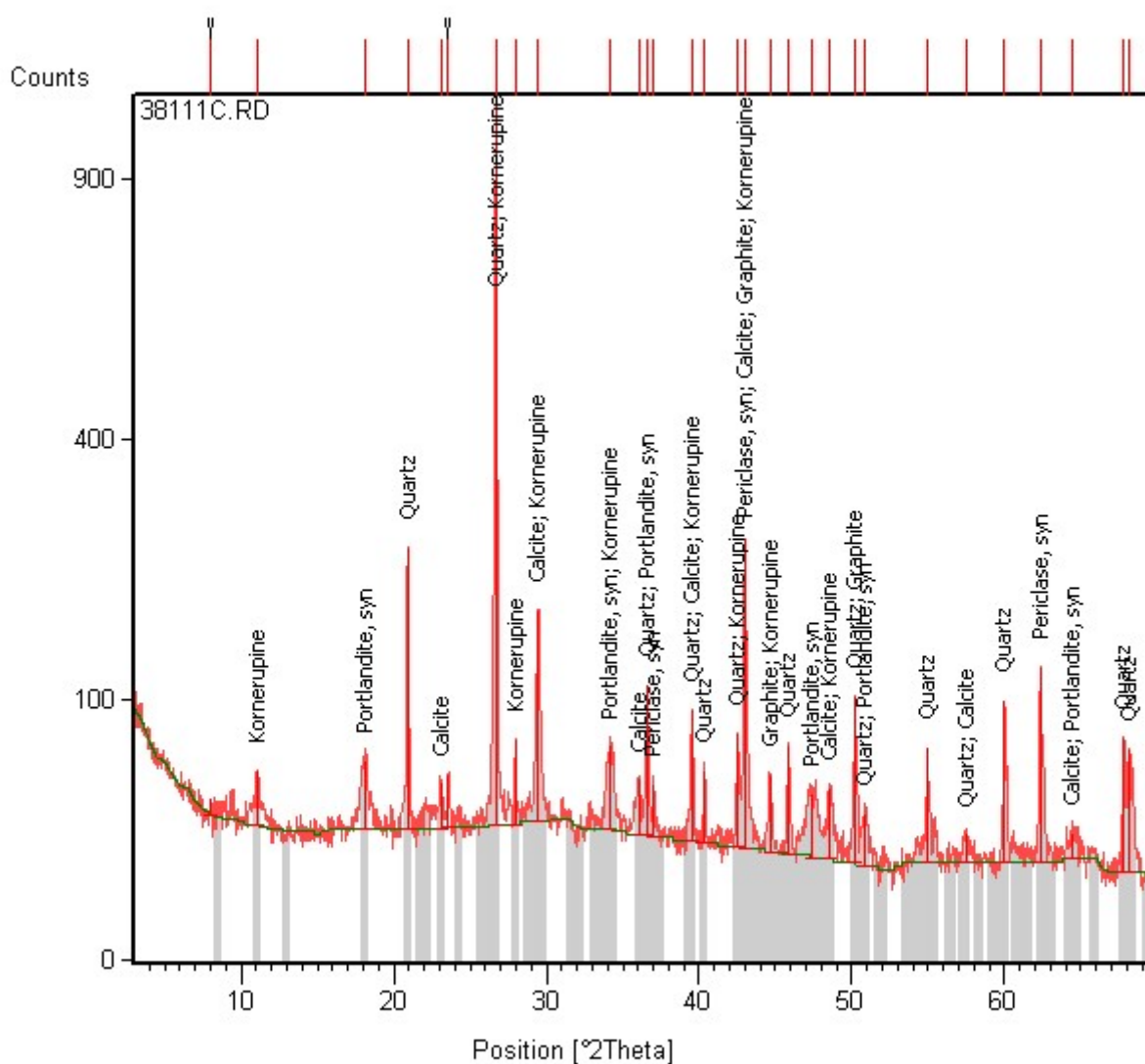


FIGURA 4.15 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 14 DIAS DE CURA

O DRX para o corpo de prova de 60 dias está representado pela Tabela 4.16 e pela Figura 4.16.

TABELA 4.16 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 60 DIAS

Nome do composto	Fórmula Química
Quartzo	SiO_2
Portlandite	Ca(OH)_2
Periclase	MgO
Calcite	CaCO_3
Grafite	C
Kornerupine	$\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si}_{0.8},\text{Al}_{0.2})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$
Kornerupine	$\text{Fe}_4\text{Mg}_{10}\text{Al}_{25}(\text{Si},\text{B})_{18}\text{O}_{86}$
Tobermorite	$(\text{CaO})_x\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$

Na Figura 4.16 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica do corpo de prova com 60 dias de cura a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura cristalina (quartzo). Já em 60 dias pode-se verificar a presença de kornerupine sob duas formulações químicas diferentes, além dos outros compostos que apareceram no decorrer dos dias de cura como a periclase e a portlandite. Neste ponto de 60 dias a interação entre os componentes se destaca de forma a tornar o material mais resistente como verificado na seção 4.2.11.

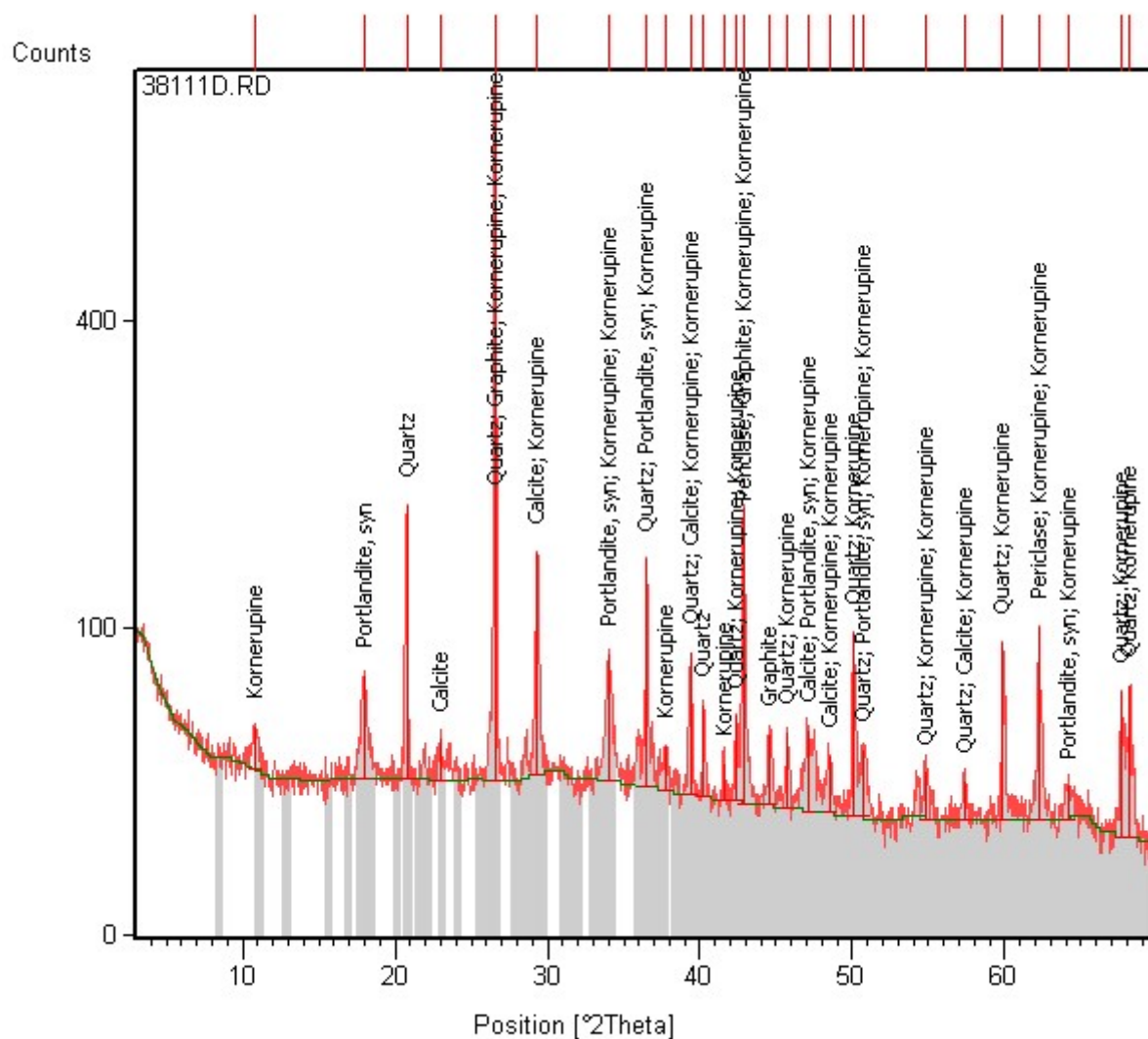


FIGURA 4.16 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 60 DIAS DE CURA

O DRX para o corpo de prova de 180 dias está representado pela Tabela 4.17 e pela Figura 4.17.

TABELA 4.17 – RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PARA O CORPO DE PROVA DE 180 DIAS

Nome do composto	Fórmula Química
Quartzo	SiO_2
Portlandite	Ca(OH)_2
Periclase	MgO
Calcite	CaCO_3
Grafite	C
Kornerupine	$\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si}_{0.8},\text{Al}_{0.2})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$
Kornerupine	$\text{Fe}_4\text{Mg}_{10}\text{Al}_{25}(\text{Si},\text{B})_{18}\text{O}_{86}$

Na Figura 4.17 mostra-se o gráfico de caracterização mineralógica do corpo de prova com ‘180 dias de cura a partir da análise de DRX, com a presença de picos clássicos, característicos de uma estrutura cristalina (quartzo). Já em 180 dias de cura pode-se verificar a presença de periclase e portlandite. Neste ponto, de 180 dias, a interação entre os componentes se destaca de forma a tornar o material ainda mais resistente.

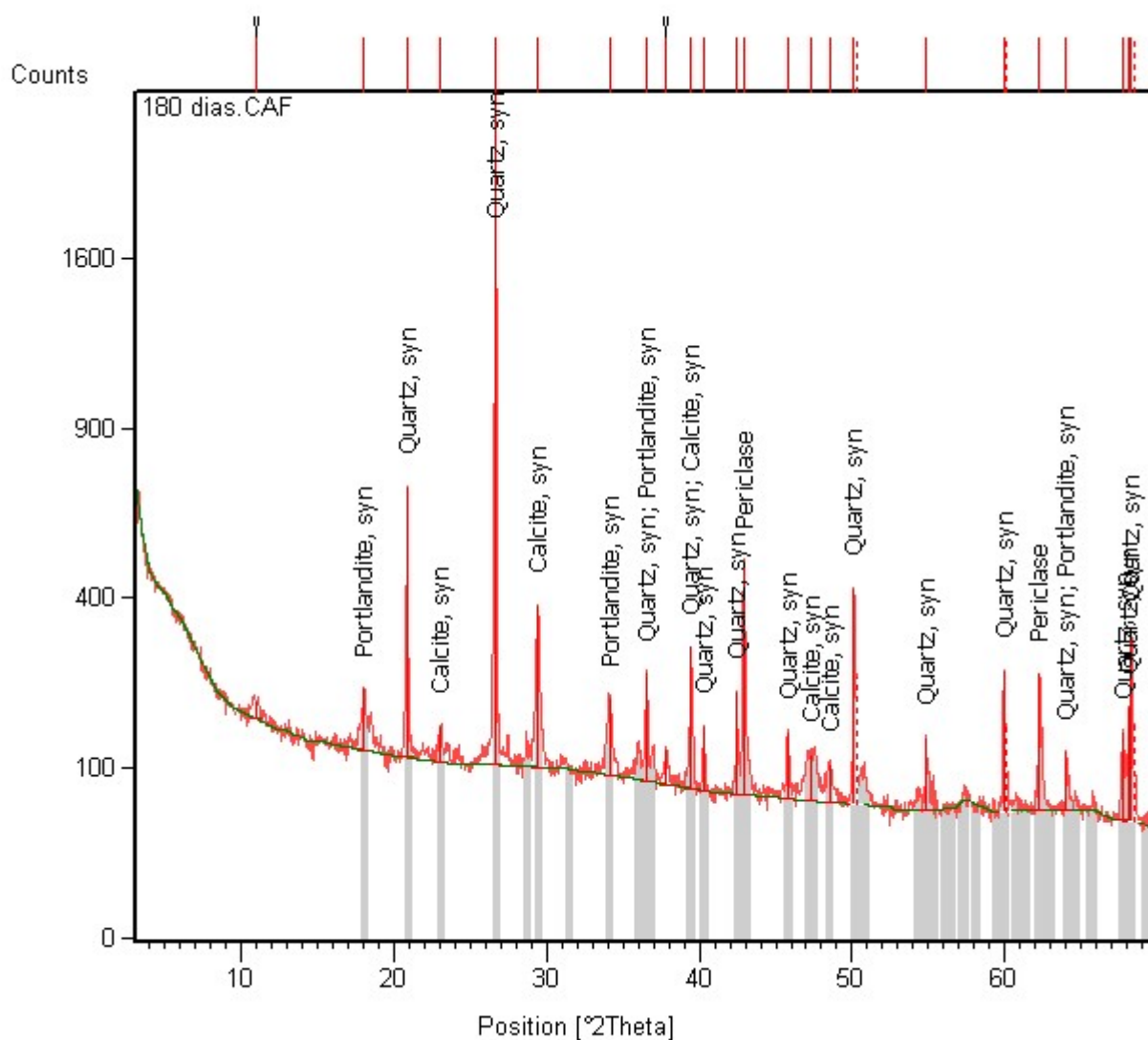


FIGURA 4.17 – DIFRATOGRAMA DA COMPOSIÇÃO 5 COM 180 DIAS DE CURA

Para verificar melhor as estruturas mineralógicas da composição 5 conforme as idades os resultados estão apresentados na Tabela 4.18.

**TABELA 4.18 – MUDANÇAS DE COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DE AMOSTRAS
DE COMPOSIÇÃO 5 DURANTE A CURA**

Mistura seca	3 dias	14 dias	60 dias	180 dias
Quartzo - SiO_2	Quartzo - SiO_2	Quartzo - SiO_2	Quartzo - SiO_2	Quartzo - SiO_2
Portlandite - Ca(OH)_2	Portlandite - Ca(OH)_2	Portlandite - Ca(OH)_2	Portlandite - Ca(OH)_2	Portlandite - Ca(OH)_2
Periclase – MgO	Periclase – MgO	Periclase – MgO	Periclase – MgO	Periclase – MgO
Calcite - CaCO_3	Calcite - CaCO_3	Calcite - CaCO_3	Calcite - CaCO_3	Calcite - CaCO_3
Grafite – C	Grafite – C	Grafite – C	Grafite – C	Grafite – C
	* Kornerupine – $\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si},\text{Al},\text{B})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$	Kornerupine – $\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si},\text{Al},\text{B})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$	Kornerupine - $\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si}_{0.8},\text{Al}_{0.2})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$ e * $\text{Fe}_4\text{Mg}_{10}\text{Al}_{25}(\text{Si},\text{B})_{18}\text{O}_{86}$	Kornerupine - $\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si}_{0.8},\text{Al}_{0.2})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$ e $\text{Fe}_4\text{Mg}_{10}\text{Al}_{25}(\text{Si},\text{B})_{18}\text{O}_{86}$
	* Tobermorite - $(\text{CaO})_x\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	Tobermorite - $(\text{CaO})_x\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	Tobermorite - $(\text{CaO})_x\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	

Nota: * novas formações cristalinas com o decorrer do tempo

Os dados da Tabela 4.18 confirmam que com o tempo de hidratação e cura aparecem minerais de duas modificações cristalinas de Kornerupine – $\text{Mg}_3\text{Al}_6(\text{Si}_{0.8},\text{Al}_{0.2})_5\text{O}_{21}(\text{OH})$ e $\text{Fe}_4\text{Mg}_{10}\text{Al}_{25}(\text{Si},\text{B})_{18}\text{O}_{86}$ e Tobermorite – $(\text{CaO})_x\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$. E há um aumento na intensidade dos picos de Calcite – CaCO_3 . Além de ser bem visível também o crescimento do teor de materiais amorfos, especialmente comparando os difratogramas de material seco e com 180 dias de cura.

4.2.2.4 Microscopia eletrônica de varredura com microanálise química (MEV-EDS)

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam os resultados da análise de MEV com EDS para os corpos de prova da composição 5, os quais confirmam os resultados obtidos nas análises de DRX. Vale ressaltar que são pontos representativos de toda a superfície da amostra no tempo de 3, 14 e 60 dias de cura.

Nas análises de MEV-EDS foram observadas as composições morfológicas dos corpos de prova.

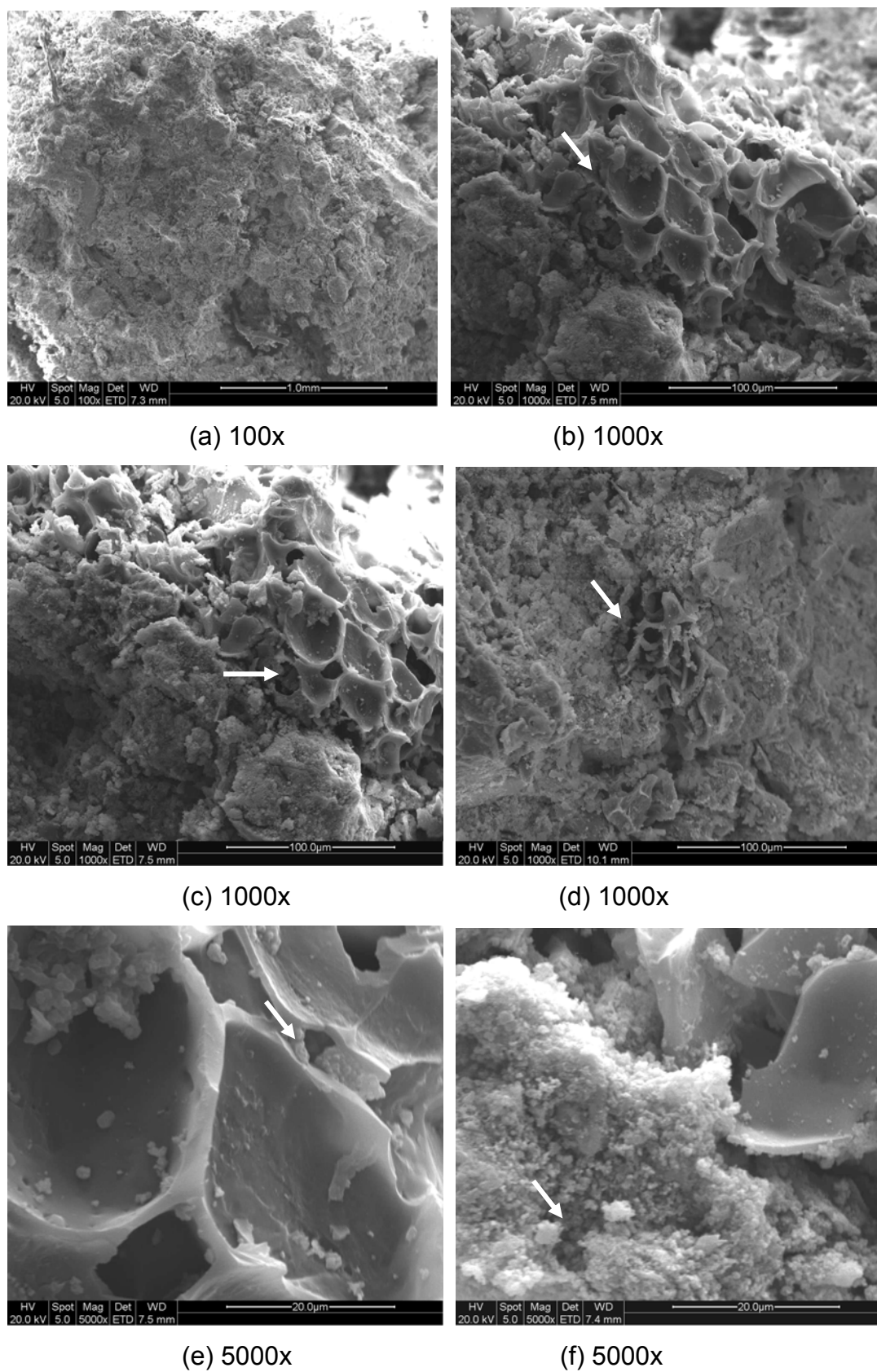


FIGURA 4.18 – MICROGRAFIAS PARA O CORPO DE PROVA DA AMOSTRA 5 NA IDADE DE 3 DIAS (a) 100X, (b), (c) (d) 1000X E (e) E (f) 5000X

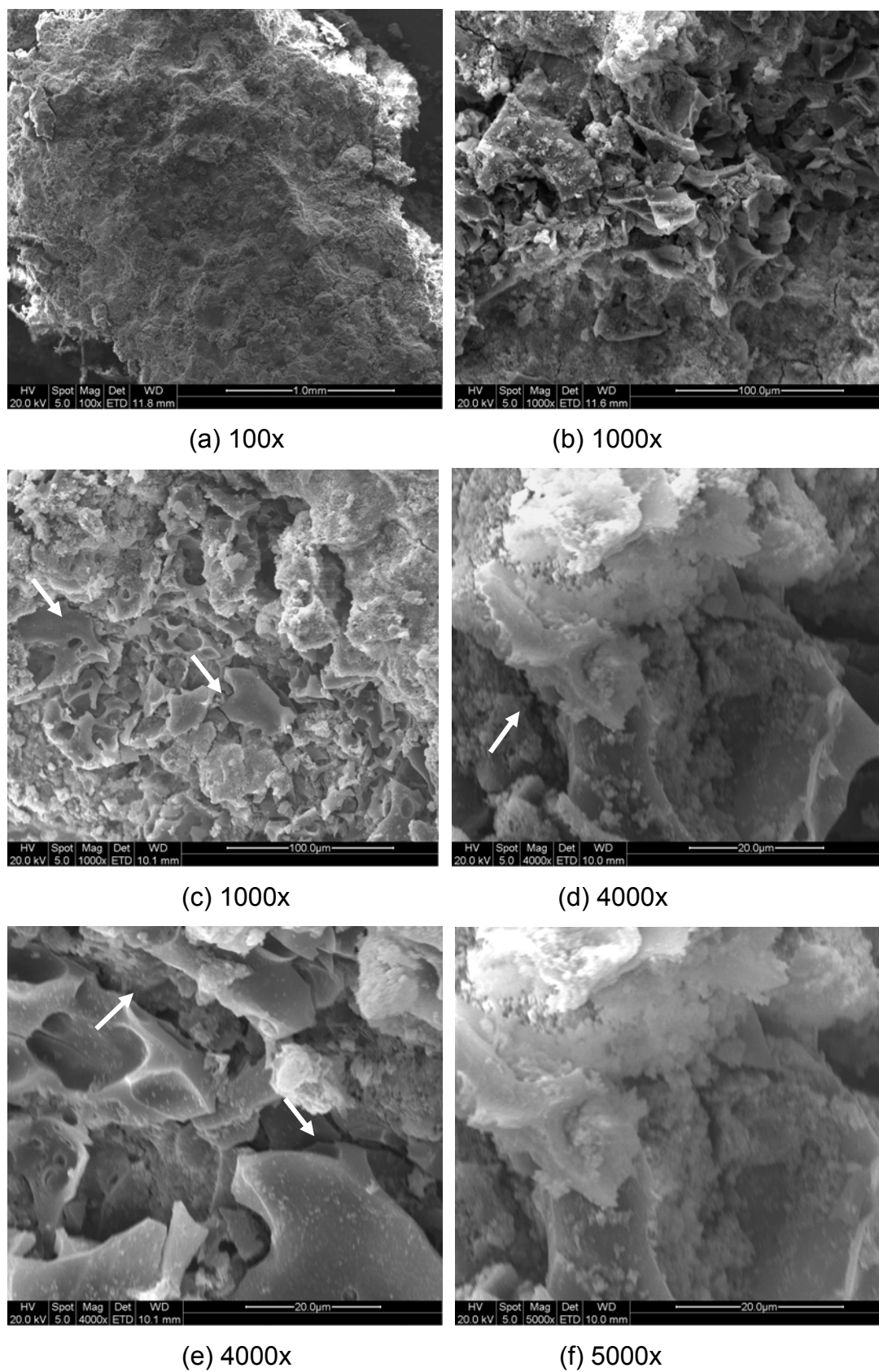


FIGURA 4.19 – MICROGRAFIAS PARA O CORPO DE PROVA DA AMOSTRA 5 NA IDADE DE 14 DIAS (a) 100X, (b), (c) 1000X, (d) E (e) 4000x E (f) 5000X

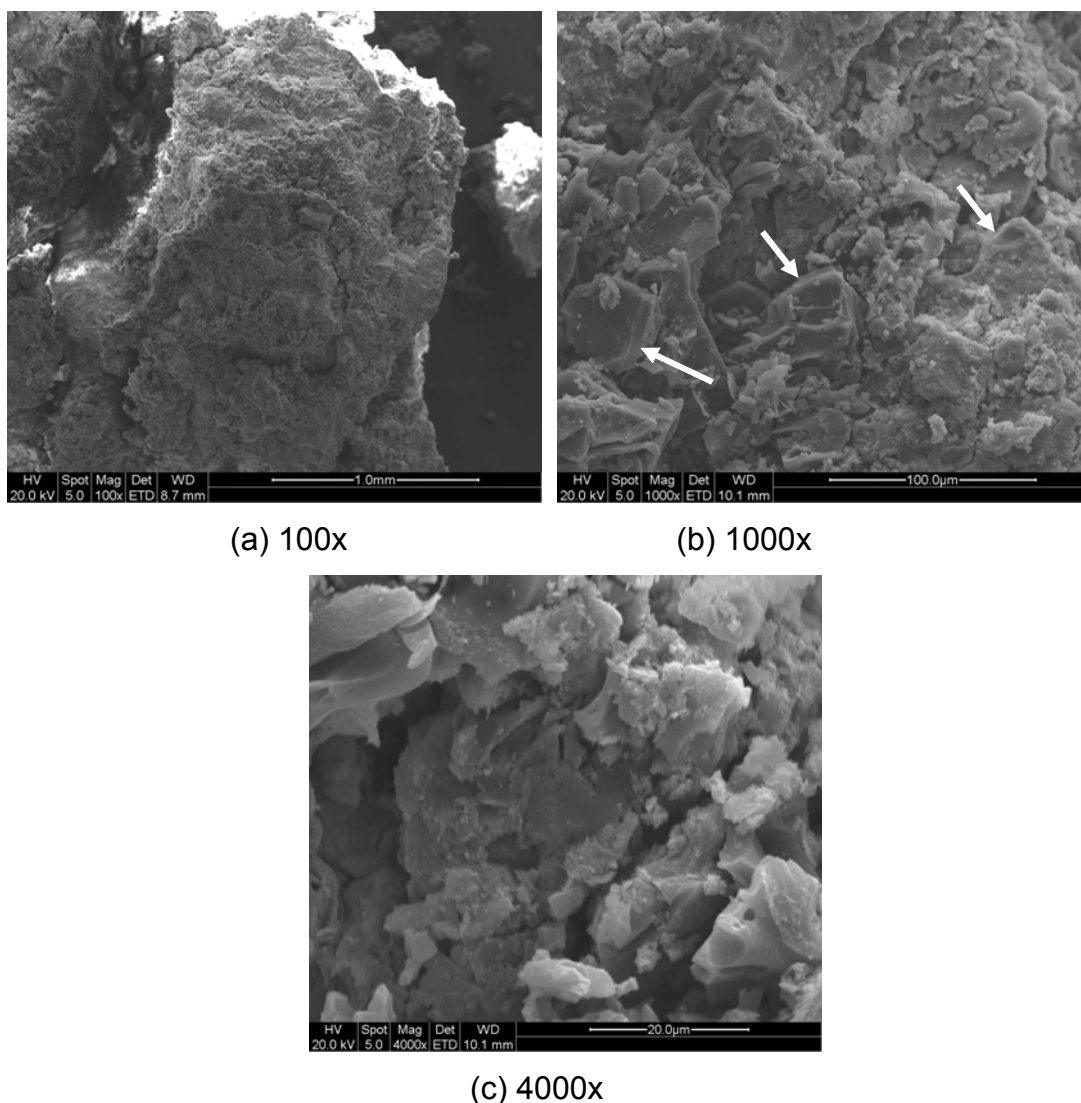


FIGURA 4.20 – MICROGRAFIAS PARA O CORPO DE PROVA DA AMOSTRA 5 NA IDADE DE 60 DIAS (a) 100X, (b) 1000X E (c) 4000X

O resultado da aplicação da microscopia eletrônica de varredura permite observar que nas micrografias (b) e (c) (Figura 4.18) do corpo de prova com 3 dias, ainda há pedaços de cinzas porém que a porosidade do material é menor do que a verificada anteriormente na matéria-prima (Figura 4.18). Isto porque em 3 dias já há uma interação e mesmo que se note alguns pedaços de cinza, estes já não são tão frequentes. Com a magnificação das imagens (Figuras 4.18 d) é possível observar já um campo ligado devido à hidratação, e na micrografia (f) também aparecem ainda alguns microporos.

Para os corpos de prova de 14 dias da Figura 4.19 é verificado que a resistência cresce uma vez que há uma maior interação entre os componentes. Na micrografia (c) (Figura 4.19) as partículas já estão mais juntas do que separadas,

porém de alguma forma ainda espalhadas. Porém nota-se que o material não é liso porque não há um fundente que una as partículas. Mesmo havendo interação entre eles, a presença de microporos e trincas diminuem a resistência do material. A micrografia (d) (Figura 4.19) mostra que, em algumas partes, o corpo de prova com 14 dias já está com as partículas mais ligadas entre si.

Na figura 4.20 estão as micrografias dos corpos de prova com 60 dias. Na Figura 4.20, de menor magnificação (100x), já aparecem estruturas monolíticas, e na micrografia (b) pode-se notar a presença de novas formas cristalinas como cristais hexagonais e em forma de retângulo e de losango. Estas novas cristalizações indicam que o material com o tempo está adquirindo maior resistência e as partículas estão reagindo e se interligando. O fato de haver poucas e pequenas trincas serve de apoio para esta afirmação. Uma vez que as trincas atrapalham e dificultam o aumento da resistência do material, pois são como fronteiras entre as diferentes partículas que separam os componentes.

Na área 3 e 4 das micrografias representadas pelas Figuras 4.21 e 4.22 foi realizada a micro-análise química de EDS no corpo de prova com 3 e 60 dias, seus resultados estão apresentados na Figura 4.23 e 4.24 e Tabela 4.19, confirmando os resultados da FRX.

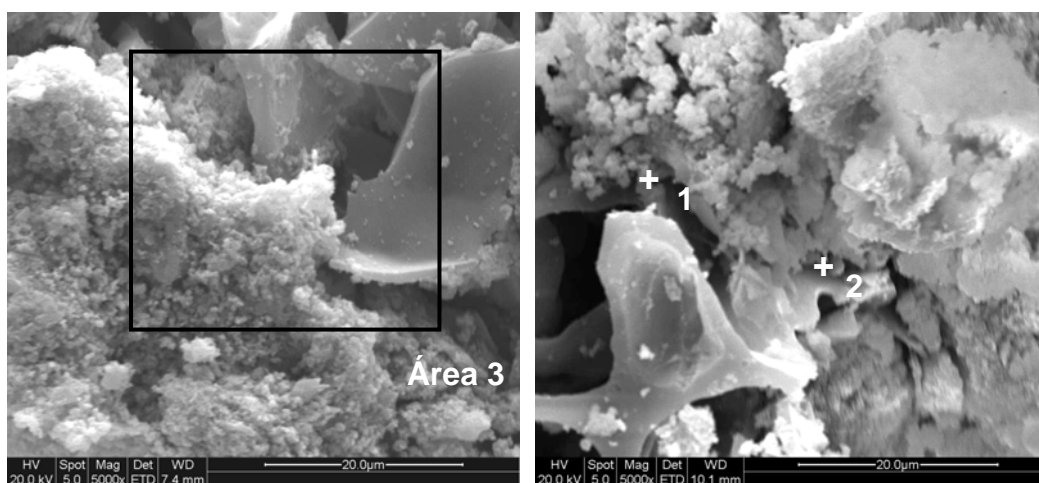


FIGURA 4.21 – MICROGRAFIAS DO CORPO DE PROVA COM 3 DIAS 5000X

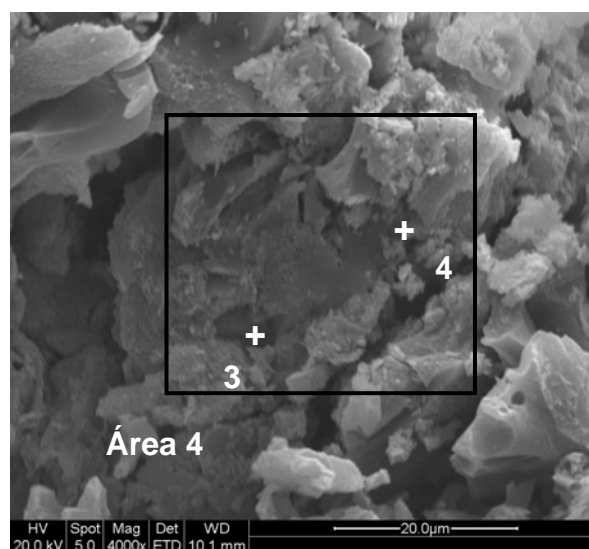


FIGURA 4.22 – MICROGRAFIAS DO CORPO DE PROVA COM 60 DIAS 4000X

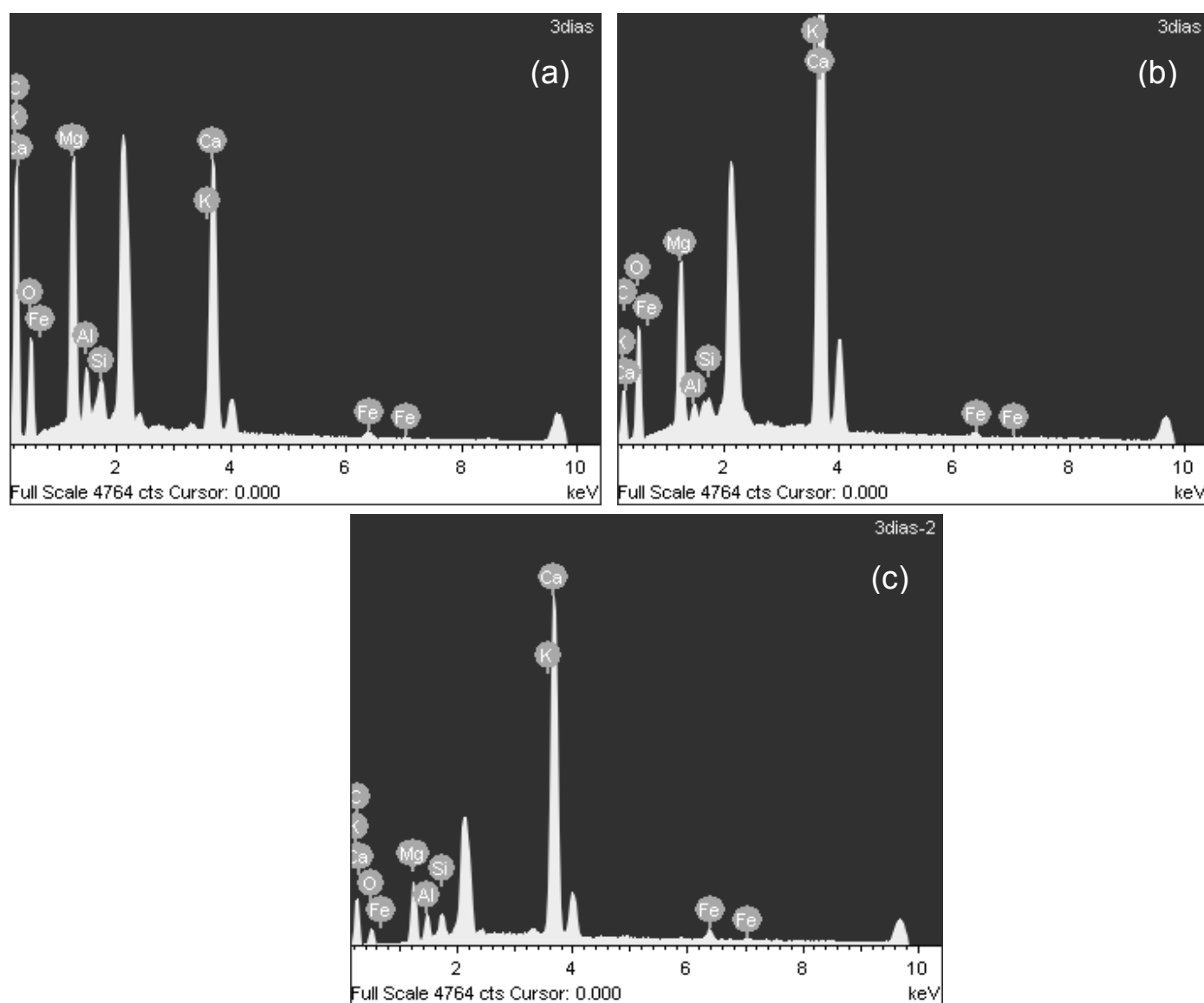


FIGURA 4.23 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DOS CORPOS DE PROVA COM 3 DIAS

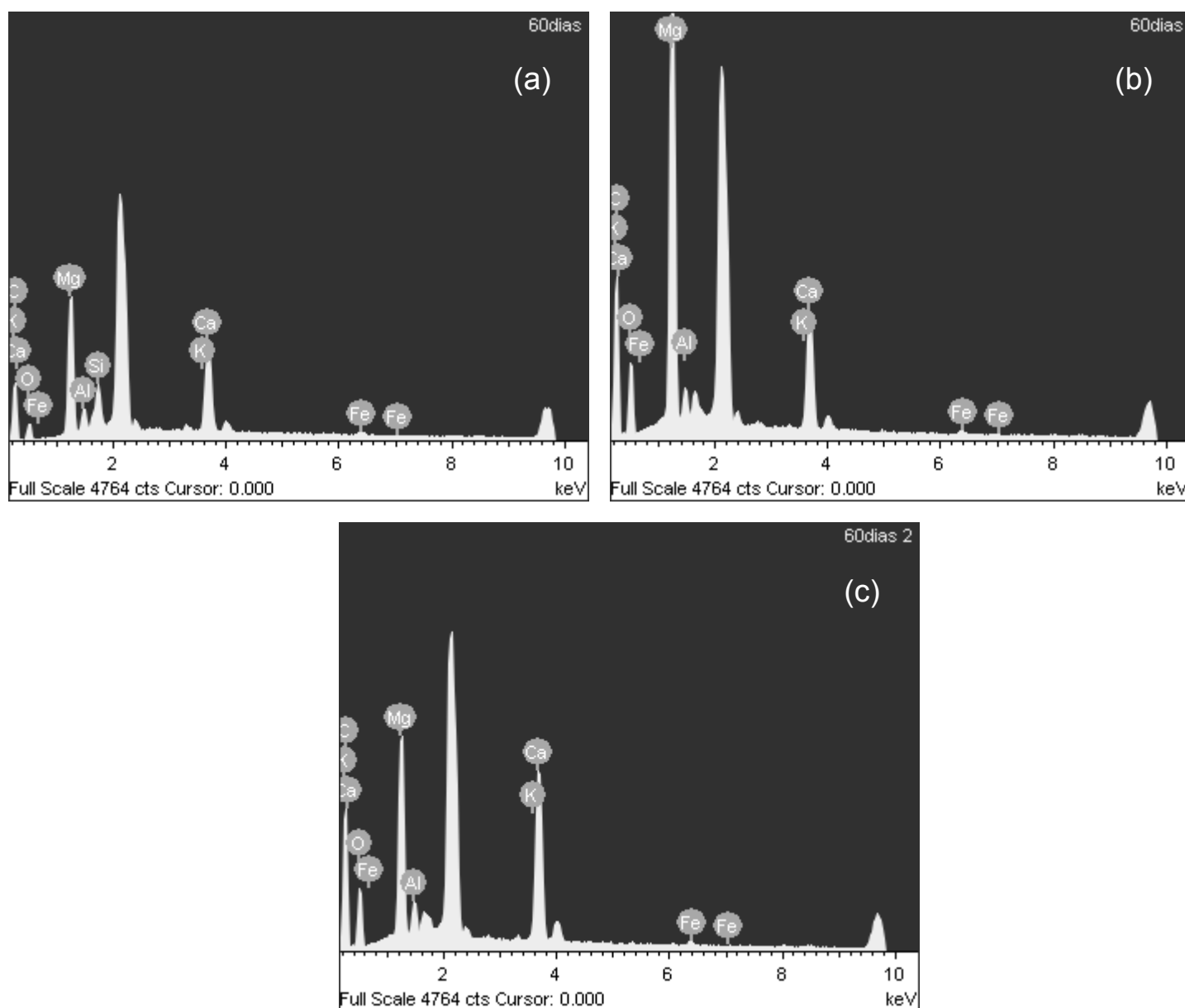


FIGURA 4.24 – MICRO-ANÁLISE QUÍMICA DOS CORPOS DE PROVA COM 60 DIAS

TABELA 4.19 – ANÁLISE DE EDS DA ÁREA GERAL DA MICROGRAFIA DO CORPO DE PROVA EM 3 E 60 DIAS

		C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total
3 dias	Área 3	46,76	25,98	9,20	1,79	1,03	0,32	13,96	0,97	100
3 dias	Ponto 1	9,85	37,97	7,60	0,71	0,35	0,22	42,65	0,66	100
3 dias	Ponto 2	25,30	15,86	5,69	2,25	1,82	0,70	44,62	3,75	100
60dias	Área 4	46,24	14,69	14,93	2,66	3,96	0,74	15,24	1,54	100
60 dias	Ponto 3	47,29	22,29	19,90	1,56	-	0,23	8,18	0,56	100
60 dias	Ponto 4	43,43	26,01	11,83	2,08	-	0,38	15,2	1,07	100

Comparando os valores de composição química das Áreas 1 e 2 através de EDS é possível confirmar grande diferença de teores de Mg, Al e Si, característica de substâncias amorfas. Já na comparação química dos diferentes pontos destas áreas, a diferença de teores de praticamente todos os elementos observados é muito maior. Esta informação confirma alto teor de materiais amorfos, de acordo com os resultados de DRX.

4.2.2.5 Análise de dilatométrica

As Tabelas 4.20 e 4.21 apresentam os resultados da dilatométrica foi verificada através de paquímetro digital para todas as composições estudadas, esta análise foi realizada em triplicata nos CP's com 90 e 180 dias de idade. Partindo que no início todos eles possuíam o diâmetro de 20 mm.

TABELA 4.20 - RESULTADOS DA DILATOMETRIA PARA OS CORPOS DE PROVA COM 90 DIAS

Composição	Diâmetro após 90 dias (mm)	Dilatação (%)
1	20,19 ± 0,02	0,93
2	20,29 ± 0,02	1,72
3	20,36 ± 0,03	1,82
4	20,47 ± 0,02	2,35
5	20,28 ± 0,03	1,40
6	20,42 ± 0,02	2,03
7	20,47 ± 0,04	2,33

TABELA 4.21 - RESULTADOS DA DILATOMETRIA PARA OS CORPOS DE PROVA COM 180 DIAS

Composição	Diâmetro após 180 dias (mm)	Dilatação (%)
1	20,19 ± 0,06	1,18
2	20,26 ± 0,01	1,26
3	20,34 ± 0,02	1,68
4	20,45 ± 0,05	2,02
5	20,26 ± 0,01	1,31
6	20,45 ± 0,11	1,63
7	20,47 ± 0,04	1,95

Os dados foram plotados nas seguintes Figuras 4.25 e 4.26 para facilitar a visualização dos resultados da dilatação dos corpos de prova.

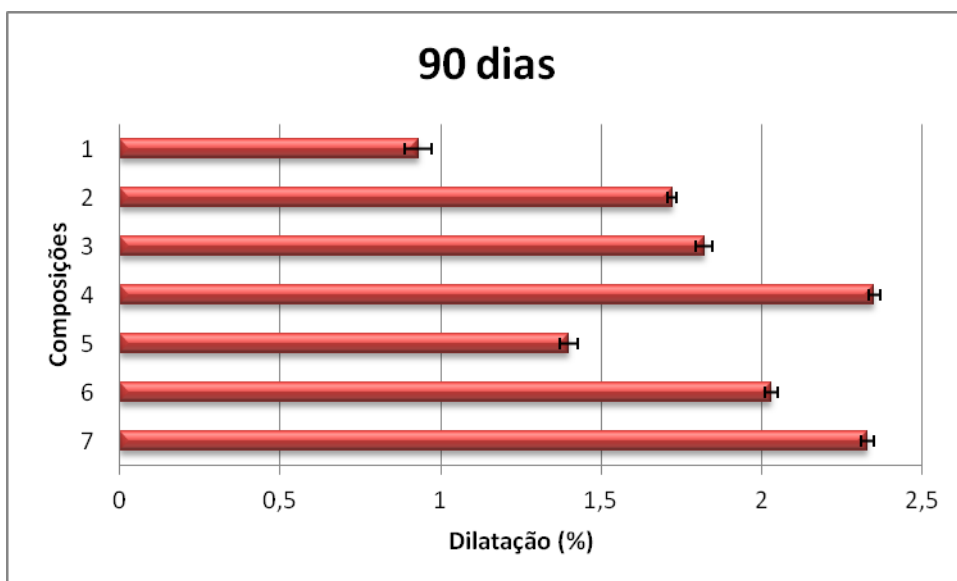


FIGURA 4.25 – DILATAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM 90 DIAS

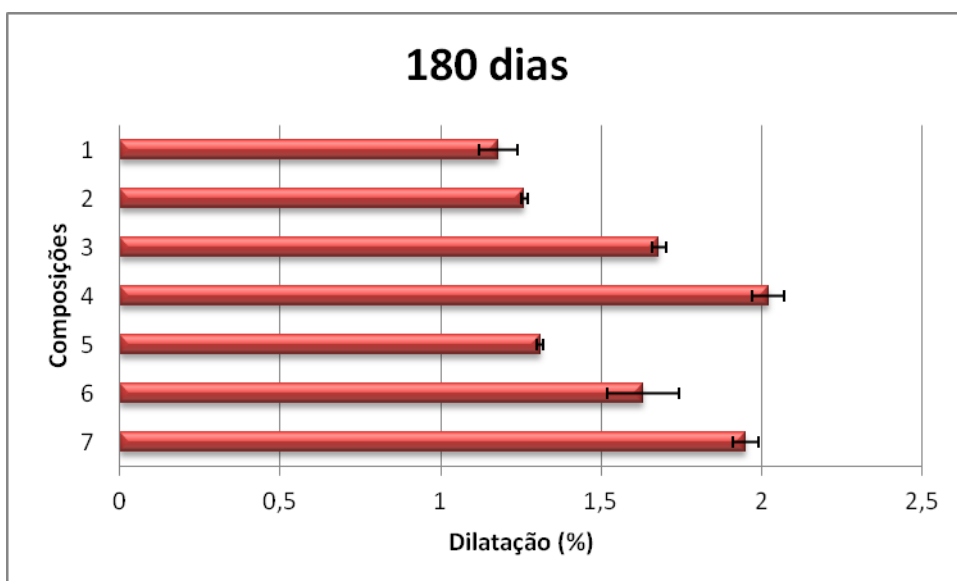


FIGURA 4.26 – DILATAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM 180 DIAS

Conforme visto tanto na Tabela 4.20 e na Figura 4.24 pode-se ver que as composições 4 e 7 apresentaram maior dilatação após 90 dias, e também o mesmo foi verificado para 180 dias de sua confecção. Enquanto a composição 1 foi a que manteve mais seu diâmetro inicial.

Os resultados da dilatometria demonstraram variação entre 0,93 e 2,35 %

para 90 dias de maneira diretamente proporcional ao aumento do teor de cinzas. Com menos lodo utilizado nas composições foram verificadas maiores dilatações nos CP's, podendo ser considerado que a consequente menor hidratação da composição deixa o CP mais poroso e menos compactado. O menor teor de cal apresentou menor dilatação nos dois tempos de cura, e a composição 5 teve dilatação de 1,40% em 90 dias estando em um valor médio comparado com as outras composições..

Já para os 180 dias, a Tabela 4.21 e a Figura 4.25 confirmam as dilatações verificadas, mesmo que em porcentagens um pouco menores.

É notável que a maior expansão, verificada pela composição 4, afeta negativamente a propriedade de resistência a compressão uniaxial, a qual foi a menor de todas as composições chegando a ser $3,32 \pm 0,47$ MPa no 180º dia.

Solyon em 90 dias alcançou uma dilatação dos corpos de prova em torno de 5%, diferentemente ao verificado nesse trabalho que esteve em torno de 2,02%.

4.2.3 Comparações com padrões da legislação brasileira

Conforme a NBR 7170 (ABNT, 1983), a resistência uniaxial dos tijolos maciços deve ser menor do que 2,5 MPa, para a classe A, entre 2,5 e 4,0 MPa, para classe B e maior do que 4,0 MPa, para classe C.

De acordo com a NBR 7171 (ABNT, 1992), a resistência uniaxial dos blocos cerâmicos deve apresentar valores entre 1,5 e 2,5 MPa, para a classe 15, e entre 2,5 e 4,5 MPa, para a classe 25.

De acordo com a Tabela 4.10 de resistência a compressão pode-se notar que os valores de resistência já em 90 dias passaram de 4,0 MPa, classificando estes corpos de prova na classe C da NBR 7170. Já com relação à NBR 7171 seus valores foram superiores ao pedido para classe 25 (resistência entre 2,5 e 4,5 MPa).

Os resultados evidenciam que os materiais desenvolvidos estão em conformidade com as normas citadas e ultrapassam muitas vezes o limite máximo indicado.

4.2.4 Considerações sobre o reaproveitamento de resíduos

A fabricação de blocos para a construção civil a partir de resíduos industriais e a não utilização de queima, nem adição de cimento de Portland, processo

proposto neste trabalho, é uma forma interessante de reaproveitamento de resíduos.

Trabalhos similares de reaproveitamento de resíduos industriais para novos materiais para a construção civil têm sido desenvolvidos com excelentes resultados (CORRÊA e MYMRINE, 2007; BORGIO e MYMRINE, 2007; MYMRINE e PONTE, 2008).

Diante dos resultados analisados ficou comprovada a possibilidade da aplicação de reaproveitamento para o lodo físico-químico de ETE de produção de painéis de MDF.

Se for praticado este reaproveitamento no campo industrial o maior ganho será na área ambiental, uma vez que o uso de resíduo industrial como matéria-prima é a forma adequada para evitar contaminação do Meio Ambiente e redução da extração de recursos naturais.

5. CONCLUSÕES

A partir desta pesquisa pode-se afirmar que o processo industrial de produção de painéis de MDF pode ser aperfeiçoado, com o uso de técnicas de minimização e de reaproveitamento. Com relação ao pós-tratamento da água residuária a viabilidade de se utilizar ensaios de coagulação/floculação está no fato da técnica ser mais simples e barata em comparação às outras tecnologias existentes. No estudo com a coagulação/floculação os testes apresentaram resultados satisfatórios, especialmente o teste com sulfato de alumínio (140 ppm) e auxiliar de coagulação catiônico (KFCP 604 – 1ppm) obteve o melhor desempenho. Todos os parâmetros analisados para esta tecnologia, à exceção da DQO, estavam aptos a atender as diretrizes de reúso em geral. Porém para a aplicação em torres de resfriamento, cujo limite é menor que 30 mg/l os resultados foram maiores (38,32 mg/l) que o permitido no ensaio de coagulação/floculação seguido de flotação, porém quando seguido de sedimentação alcançou o valor de 26 mg/l possibilitando, assim, o seu uso.

Os resultados do reaproveitamento mostraram que os resíduos industriais usados nesta pesquisa (lodo de tratamento físico-químico, cinzas de biomassa da indústria de painéis de MDF e resíduos de indústria de cal) podem ser usados como matérias-primas principais para a produção de novos materiais de construção civil, sem queima e sem adição de cimento Portland. Os materiais desenvolvidos possuem boas propriedades mecânicas: alta resistência à compressão uniaxial (até 8,37 MPa), coeficiente de resistência à água (0,60 - 0,82 no 60º dia e 0,62 e 0,85 no 90º dia), absorção de água (0,77 - 1,61 no 60º e 0,86 - 1,65 no 90º dia) e dilatométrica (0,93 e 2,35 % no 90º dia). Estas características estão de acordo com as demandas de NBRs para materiais de construção civil de tipo tijolos maciços ou furados. Estes altos valores de propriedades mecânicas podem ser explicados pelo surgimento de novas formações, através de dissolução de alumi-silicatos das matérias-primas iniciais em ambiente úmido e alcalino proveniente da mistura das mesmas, e especialmente pelo crescimento de estruturas carbonáceas amorfas e cristalinas. Os materiais desenvolvidos são economicamente atrativos devido ao baixo custo dos resíduos industriais usados. E a maior vantagem de seu uso é ambiental por diminuir a extração de matérias-primas naturais e utilização de resíduos industriais acima citados evitando a contaminação do meio ambiente pela má disposição dos mesmos.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementação dos resultados obtidos neste estudo, seguem algumas recomendações de trabalhos futuros:

- avaliar a viabilidade econômica da aplicação do pós-tratamento da água residuária visando seu reúso no campo industrial e o reaproveitamento do lodo físico-químico ao invés de destiná-lo a aterros;
- realizar ensaios de solubilização e lixiviação com o lodo físico-químico e com o material preparado, uma vez que a presença de alumínio em sua composição pode apresentar níveis de toxicidade;
- aplicar outras técnicas de caracterização nos corpos de prova confeccionados a fim de verificar sua qualidade e durabilidade, entre as quais se pode citar: permeabilidade, massa específica e porosidade;
- avaliar se o lodo físico-químico presente neste novo material com características adequadas para uso na construção civil não atacaria a armadura gerando corrosão devido seu grau de umidade;
- propor o reaproveitamento de outros resíduos deste tipo de processo industrial e
- implantar as alternativas propostas e avaliar os resultados.

REFERÊNCIAS

ABDESSEMED, D; NEZZAL, G. Treatment of primary effluent by coagulation-adsorption-ultrafiltration for reuse. **Desalination**, v.152, n. 10, p. 367-373, 2003.

ABIPA - Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira. **MDF - Medium Density Fiberboard - Painéis de Fibra de Média Densidade**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/produtosMDF.php>>. Acesso em: 02 mar. 2011.

ABIPA - Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira. **MDF – Número de produção, importação, exportação e consumo interno**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/numeros.php>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

ABNT. **NBR 7.170**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. **NBR 7.171**: Blocos cerâmicos para alvenaria. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. **NBR 5.739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1994

ABNT. **NBR 6.453**: Cal virgem para construção civil – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 9.778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 15.316 - 2**: Chapas de Fibra de média densidade (MDF) – Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

AECWeb – O Portal da Arquitetura, Engenharia e Construção. **Painéis MDF da DURATEX**. Disponível em: <<http://www.aecweb.com.br/duratex/destaques/guia-de-fornecedores-e-fabricantes/detalhes/7505/0/20>>. Acesso em: 01 mar. 2011.

AGUILERA, J.M; STANLEY, D.W. **Microstructural principles of food processing and engineering**. 2 ed. An Aspen Publication: Springer Verlag, 432p., 1999.

ALVES, J.S.; PALOMBO, C.R. **Prevenção à Poluição: Manual para a implementação do programa**. CETESB. São Paulo. 51p., 1995.

AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R. **Coagulation processes: destabilization, mixing and flocculation**. In: PONTIUS, F. W. (Ed.). Water quality and treatment – a handbook of community water supplies. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA), **Microsistema de dados hidrometeorológicos - subsistema de qualidade de água**. Brasília: ANEEL, 2000.

ANGELAKIS, A. N.; BONToux, L. Wastewater reclamation and reuse in Eureau countries. **Water Policy Journal**, Alexandria, v.3, 2001.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed., 1998.

ASANO, T. Planing and implementation of water reuse projects. **Water Science and Technology**. Grã Bretanha, v. 24, n. 9, p. 1-10, 1991.

AZEVEDO NETTO, J. M.; MANFRINI, C.; CAMPOS, J. R.; POVINELLI, J.; PARLATORE, A. C.; HESPANHOL, I.; ROSSIN, A. C.; YAGUINUMA, S., **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**, 2ª ed. v.2, São Paulo, CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água**. São Paulo: CETESB, v.2, 1987.

BEECKMAN, G. B. Water conservation, recycling and reuse. **Water Resources Development**, Oxford, v.14, n.3, 1998.

BELINI, U. L. **Caracterização e alterações na estrutura anatômica na madeira do Eucalyptus grandis em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BORG, S. C. **Minimização e Reciclagem de lodo galvânica e poeira de jateamento**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BORG, S. C.; MYMRINE, V. Galvanic processes wastes recycling for producing of ceramic materials. **Resources, conservation & recycling**, v. 38, p. 137, 2007.

CAMP, T. R.; STEIN, P. C., **Velocity gradients and internal work in fluid motion**. Journal Boston Society of Civil Engineers, v.30, p.209, 1946, citado por: METCALF & EDDY, INC, Wastewater engineering: treatment and reuse, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

CENDOFANTI, A. C. **Minimização de resíduos de uma fábrica de carvão ativado e de goma resina**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. **Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federal do Brasil, Brasília, 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o**

seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federal do Brasil, Brasília, 2005.

CORRÊA, S. M. **Compósito à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal.** 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CORRÊA, S. M.; MYMRINE, V. New construction material from concrete production wastes and lime production waste. **Construction and Building Materials.** v. 21, p. 578-582, 2007.

CRITTENDEN, B.; KOLACZKOWSKI, S. **Waste minimization: a practical guide.** Rugby: Institution of Chemical Engineers, 81p., 1995.

CROOK, J. **Water reclamation and reuse.** In: PONTIUS, F. W. (Ed.). Water quality and treatment – a handbook of community water supplies. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

DEGANI, L. F. S., **Apostila do Curso de Tratamento de Águas Industriais,** Curitiba: Degani – Departamento de Divulgação Técnica, 1981.

DREW. **Princípios de tratamento de água industrial.** Tradução: Thomas J. Buchard; revisão técnica: Charles R. Lehwing. São Paulo: DREW Produtos Químicos, 1979.

DUARTE, L. C., JUCHEM, P. L, PULZ, G. M; BRUM, T. M. M. de, CHODUR, N; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros.** Pesquisas em Geociências. 3-15p. Porto Alegre: 2003.

ECKENFELDER JR, W. W., **Industrial water pollution control.** 2nd. Ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

EPA – Environmental Protection Agency. **Waste minimization opportunity assessment manual.** Ohio: EPA. 96p. 1988.

EPA – Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse.** EPA/625/R-04/108, Washington, DC, September, 2004.

FILHO, P. L. C.; DI BERNARDO, L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** v.8, n.2, p.39-44, 2003.

GEA WIEGAND. Disponível em: <www.gea-wiegand.com/>. Acesso em: 25 fev. 2011.

GILBERT, M. J. ISO 14001/BS 7750. **Sistema de gerenciamento ambiental.** São Paulo: IMAM, 1995.

GREGORY, R.; ZABEL, T. F., **Sedimentation and flotation**. In: Water quality and treatment – a handbook of community water supplies. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

HAAS, C. N. **Desinfection**. In: PONTIUS, F. W. (Ed.). Water quality and treatment – a handbook of community water supplies. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

HARUVY, N. Wastewater reuse – regional and economic considerations. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.23, 1998.

HIGASKINO, C. E. K.; TAKAMATSU, A. A.; BORGES, J. C.; BALDIN, S. M. Determinação de coliformes fecais em amostras de lodo de esgoto por fermentação em tubos múltiplos. In: ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P. (Coord.). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. 2º ed. revisada. Paraná: SANEPAR/PROSAB, p. 49-56, 2000.

HESPANHOL, I., **Wastewater as a resource**, In: HELMER, R.; HESPANHOL, I. (Org.) Water pollution control – a guide to the use of water quality management principles: Genebra, WHO/UNEP, 1997.

HESPANHOL, I., **Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F., Reúso de Água. NISAM – USP, Barueri, SP, 2003.

HIGGINS, T. E., **Hazardous waste minimization handbook**, Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1989.

HUBER TECHNOLOGY. **Waste water solutions**. Disponível em: <<http://www.huber-technology.com/>>. Acesso em: 28 fev. 2011.

IAP – Instituto Ambiental do Paraná. **Resolução SEMA nº 042/08 – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_SEMA_42_2008_QUEIMA_RESIDUOS_CALDEIRAS.pdf>. Acesso em 28 fev. 2011.

IMHOFF, K. K. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias**. Trad. De M. L. HESS. São Paulo. Edição Edgard Blucher, 1996.

JUNIOR, A. O. **Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica**. 248f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

KIANG, Y. H.; METRY, A. A. **Hazardous waste treatment processing technology**. Michigan: AnnArbor Science, 1982.

KIELY, G. **Environmental Engineering**. London, Grã Bretanha: McGraw-Hill, 1996.

LEME, F. P., **Teoria e técnicas de tratamento de água**, São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretores e elaboração de textos básicos para normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 240f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidades de São Paulo, São Carlos, 1999.

MAIDA, E. C. **Uma alternativa de ensaio acelerado para precisão da resistência à compressão do cimento Portland utilizando energia de microondas**. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de Água**. NISAM – USP, Barueri, SP, 2003.

MANCUSO, P. C. S., **Progresso na Metodologia e na Tecnologia de Recirculação de Água na Indústria**. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE SETMA, São Paulo, 29 a 31 de agosto de 2000. Relação de trabalhos – CD-ROM, 2000.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas**. Departamento de Papel e Celulose da Área de Insumos Básicos do BNDES, 2008.

MELO, H. N. S.; NETO, C. O. A.; MELO, J. L. S.; LIMA, A. M. Estudo comparativo entre os métodos da membrana filtrante e do substrato cromogênico para determinação de coliformes fecais e *Escherichia coli*. In: **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbicos: aspectos metodológicos**. Coordenador: Carlos Augusto Lemos Chernicharo. p. 51-60, PROSAB,. Belo Horizonte – MG, 2001.

MENEZES R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. **Revista Matéria**, v.12, n.1, p. 226-236, 2007.

MERCÊ, A. L. R.; FELCMAN, J.; RECIO, M. A. L. **Molecular and Supramolecular Bioinorganic Chemistry: Applications in Medical Sciences**. 1 ed. New York, USA: Nova Science Publishers, v.1, 100p., 2008.

MERCÊ, A. L. R.; FELCMAN, J.; RECIO, M. A. L. **Molecular and Supramolecular Bioinorganic Chemistry: Applications in Medical and Environmental Sciences**. 2 ed. New York, USA: Nova Science Publishers, v.2, 200p., 2010.

METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reúso como ferramenta para gerenciamento de águas e efluentes na indústria – estudo de caso da KODAK brasileira**, Tese de Doutorado. EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MIERZWA J. C.; HESPANHOL, I. **Água na Indústria: Uso Racional e Reuso**; São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MORI, A. Conversando com Alberto Mori sobre os Papéis dos Eucaliptos: papéis decorativos. **Eucalyptus online book & newsletter**, nº 14. Porto Alegre: Graus Celsius, abril 2008. Disponível em <http://www.eucalyptus.com.br/newspt_abril08.html#oitohtml> Acessado em: 23 junho de 2011.

MUJERIEGO, R.; ASANO, T. The role of advanced treatment in wastewater reclamation and reuse. **Water Science and Technology**, Exeter, Great Britain, v.40, n.4-5, p.1-9, 1999.

MYMRINE, V.; PONTE H.A. Utilização de resíduos industriais como matérias-primas principais de produção de materiais de valor. **31º Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. Santiago de Chile: p. 12-15, 2008.

NAGATA, N; BUENO, M.I.M.S; PERALTA-ZAMORA, P.G. Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos interelementos na análise quantitativa por fluorescência de Raios-x. **Química Nova**, v. 24, n. 4, 531-539, 2001.

NALCO Chemical Company, **The Nalco water handbook**, 2ª ed., Editor: Frank N. Kemmer. New York: McGraw-Hill, 1988.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giamusso. 2a edição. São Paulo: PINI, 1997.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 4ª. Edição. Editora J. Andrade Ltda., 2004.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, n.50, p.75-80, 2004.

PAVONI, J. L.; HEER JR, J. E.; HAGERTY, D. J. **Handbook of solid waste disposal: materials and energy recovery**. Van Nostrand Reinhold environmental engineering series. 549p. 1975.

PAWLOWSKY, U. **Reaproveitamento de resíduos industriais**. Curitiba: SUREHMA, 65p. 1983.

PAWLOWSKY, U. **Tecnologia Limpa**. Curso de mestrado em Tecnologia Química com ênfase em Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal do Paraná, 105p., 2010.

PERAZZO, A. R. F.; ENEDINO, T. R.; LIMA, M. A.; MELO, E. E. C. Reciclagem do lixo. **Revista extensão e sociedade**, v. 5, n. 3, 2011.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 12^a. edição. Editora Globo, 1993.

PIANTÁ, C. A. V. **Emprego de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água**. 78 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PICON, C. A.; ALMEIDA, E. F.; OLIVEIRA, N.T.C.; GUASTALDI, A.C. **Caracterização de superfícies de titânio irradiadas com laser nd: yag e depositadas com hidroxiapatita**. Foz do Iguaçu, 2006. 17^o CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2006.

PRIM, E. C. C.; CHERIAF, M.; CASTILHOS JR., A. B.; ROCHA, J. C.; LUZ, C. A. Valorização do lodo da indústria têxtil como material de construção civil utilizando a técnica de solidificação/ estabilização com cimento. In: XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. **Anais...** Lima, Peru, 1998.

RIBEIRO, R. A. C. **O processo produtivo da indústria de painéis de MDF**. Disponível em: <www.berneck.com.br>. Acessado em 4 de outubro de 2011.

RICHTER, C. A. **Água – Métodos e Tecnologia de Abastecimento**. 1^a Edição. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

SANTOS, E. P. C. C.; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA, C. P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V. L. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n.4, 2007.

SANTOS FILHO, D. F., **Clarificação de água e remoção de alguns elementos indesejáveis**, In: Tecnologia de tratamento de água – Água para indústrias. Rio de Janeiro: Almeida Neves. p.18-27, 1976.

SHIMADZU CORPORATION. Analytical measuring instruments division. **TOC-UV-CPH/ CPN Total Organic Carbon Analyser**. User's manual, Kyoto, Japão, 2003.

SILVA, C. R. **Cais Aditivadas com Pozolanas e Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado, CCT/DEQ/UFPB, Campina Grande-PB, 1992.

SILVA, T, **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública). Escola de Saúde Publica, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1999.

SILVA, J. R. R. **Caracterização físico-química de massas cerâmicas e suas influências nas propriedades finais dos revestimentos cerâmicos**. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SOLYON, G. J. P. **Minimização e Reaproveitamento de resíduos de uma indústria de tintas e impressão de papéis decorativos**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

TEIXEIRA, E. N.; BIDONE, F. R. A. Conceitos básicos. In: **Metodologias e técnicas de reutilização de resíduos sólidos urbanos**. Programa de pesquisas em saneamento básico – PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, p. 15-21, 1999.

TORQUATO, L. P.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C. MATOS, J. L. M. M. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos pelas indústrias brasileiras. **Revista Floresta**, v. 40, n.2, 2010.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAME. **Environmental Agreements and Cleaner Production: questions and answers**. UNEP: Division of Technology, Industry & Economics, 28p. 2006. Disponível em: <<http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx0833xPA-EnvAgreementsEN.pdf>> Acessado em 12 de julho de 2011.

VAN VLACK, L. H. Propriedades dos materiais cerâmicos. Tradução: Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

VERBECK, G. J. **Performance of concrete**. Toronto: University of Toronto Press, 1968.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte, v. 2,3. Ed.: SEGRAC, 452p., 2005.

WASTOWSKI, A. D. ; DA ROSA, G. M. ; RIGON, J. P. G.; CHERUBIN, M. R. **Determinação dos níveis de metais em solo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo**. In: XVII SBQSUL - Desafios em Química Tecnológica e Ambiental, 2009, Rio Grande - RS. XVII Encontro de Química da Região Sul (17SBQSul). Rio Grande: FURG, 2009.

WESTERHOFF, G. P., Un update of research needs for water reuse, In: Water Reuse Symposium, 3, San Diego, California: **Proceedings...**p. 1731-42, 1984.

WHO - World Health Organization, **Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards**, Of a WHO meeting of experts. Technical report series, Genebra: n. 517, 1973.

WIEMES, L. **Minimização de resíduos no processo de pintura da indústria automotiva**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Setor de Tecnologia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

YAO, K. M. Design of high-rate settlers. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v. EE5, Oct., p.621-637, 1973.

APÊNDICES

QUADRO A.1 – DETERMINAÇÃO DO MELHOR pH

Teste	pH	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	Flocos
Amostra		103	5,98	
Teste 01- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Temp 22,1°C, pH 7,578 e 200 ppm	5,00	344	9,58	
	6,00	22	1,40	
	7,00	35	1,37	
	8,00	35	0,97	
	9,00	18	1,09	
	10,00	40	0,77	
Amostra		109	8,85	Sem flocos
Teste 02- FeCl_3 Temp 23,1°C, pH 8,278 e 200 ppm	5,00	420	1,46	Poucos flocos
	6,00	550	3,17	Poucos flocos
	7,00	102	3,38	Flocos
	8,00	35	1,05	Flocos
	9,00	19	0,78	Flocos
	10,00	8	0,89	
Amostra		46	5,24	
Teste 03- Tanfloc SG -Temp 15,1°C, pH 7,975 e 200 ppm	5,00	81	5,76	Sem flocos
	6,00	102	7,23	Sem flocos
	7,00	244	26,6	Poucos flocos
	8,00	322	33,6	Sem flocos
	9,00	60	2,00	Muitos flocos
	10,00	52	1,40	Sem flocos
Amostra		60	4,78	
Teste 04- KCL 112 - Temp 14,8 pH 7,68 e 200 ppm	5,00	31	2,42	
	6,00	26	2,94	
	7,00	21	2,33	
	8,00	61	1,61	
	9,00	51	1,03	
	10,00	52	0,63	
Amostra		69	4,54	
Teste 05- KCL 193 - Temp 23,8°C, pH 7,79 e 200 ppm	5,00	50	2,62	
	6,00	16	1,86	
	7,00	53	1,38	
	8,00	11	1,84	Melhores flocos
	9,00	49	2,48	
	10,00	36	1,09	Sedimentação rápida

QUADRO A.2 – DETERMINAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DE COAGULANTE

Teste	Concentração (ppm)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	Flocos
Amostra		76	8,41	
Teste 01- $Al_2(SO_4)_3$ Temp 22,1°C, pH 7,758 e pH otim =6	100	22	4,70	Sem flocos
	120	38	3,30	Sem flocos
	140	35	3,18	Decantação média
	160	34	6,66	Decantação média
	180	41	9,02	Decantação demorada
	200	48	3,08	Pouca decantação
Amostra		109	8,85	
Teste 02- $FeCl_3$ Temp 23,1°C, pH 8,278 e pH otim =9	100	51	0,69	
	120	31	0,80	
	140	36	0,61	
	160	3	0,62	
	180	14	0,59	
	200	10	0,64	
Amostra		46	5,24	
Teste 03- Tanfloc SG – Temp 15,1°C, pH 7,975, pH otim 9,0	50	44	1,96	Sem flocos
	100	65	1,88	Poucos flocos
	200	57	1,65	Muitos flocos
	300	80	1,74	Poucos flocos
	400	104	1,44	Com flocos
	500	89	1,32	Flocos ruins
Amostra		60	4,78	
Teste 04- KCL 112 - Temp 14°C, pH 7,68 – pH otim 9,0	50	38	4,61	
	100	34	6,34	
	200	57	1,57	
	300	25	1,63	Melhor floco e sediment.
	400	44	1,60	
	500	21	3,01	
Amostra		69	4,54	
Teste 05- KCL 193 - Temp 23,8°C, pH 7,79 e pH otim =8	100	39	1,61	
	120	29	1,58	
	140	35	1,70	
	160	27	1,71	
	180	22	1,53	
	200	28	1,38	

QUADRO A.3 – DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO POLÍMERO KFCP 604 - CATIÔNICO

	Concentração (ppm)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	Flocos
Amostra		76	8,41	
Teste 01- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + KFCP 604 (Coagulante + Floculante)	140 + 0,10 ppm	29	1,76	
	140 + 0,50 ppm	27	1,35	
	140 + 1,00 ppm	47	1,03	
	140 + 2,00 ppm	24	1,93	
	140 + 4,00 ppm	20	1,59	
	140 + 10,00 ppm	28	1,11	
Amostra	0,0 ppm (tratado)	109	8,85	
Teste 02- FeCl_3 + KFCP 604 (Coagulante + Floculante)	160 + 0,10 ppm	27	3,02	
	160 + 0,50 ppm	70	1,01	
	160 + 1,00 ppm	40	1,09	
	160 + 2,00 ppm	29	1,18	
	160 + 4,00 ppm	45	1,64	
	160 + 10,00 ppm	50	1,93	
Amostra		93	7,65	
Teste 03- Tanfloc SG + KFCP 604 (Coagulante + Floculante)	200 + 0,10 ppm	112	4,03	Sem flocos
	200 + 0,50 ppm	107	3,59	Sem flocos
	200 + 1,00 ppm	98	3,01	Sem flocos
	200 + 2,00 ppm	126	4,23	Flocos
	200 + 4,00 ppm	112	4,38	Flocos médio
	200 + 10,00 ppm	120	4,47	Muitos flocos
Amostra		93	7,65	
Teste 04- KCL 112 + KFCP 604 (Coagulante + Floculante)	300 + 0,10 ppm	35	0,98	Poucos decant. lenta
	300 + 0,50 ppm	36	0,75	Poucos decant. média
	300 + 1,00 ppm	32	0,92	Poucos decant. média
	300 + 2,00 ppm	34	1,29	Decantação rápida
	300 + 4,00 ppm	39	1,70	Flocos
	300 + 10,00 ppm	27	1,56	Muitos flocos dec. rápida
Amostra		93	7,65	
Teste 05- KCL 193 + KFCP 604 (Coagulante + Floculante)	160 + 0,10 ppm	61	0,64	Sem flocos
	160 + 0,50 ppm	37	0,93	Sem flocos
	160 + 1,00 ppm	19	0,53	Sem flocos
	160 + 2,00 ppm	63	0,82	Sem flocos
	160 + 4,00 ppm	44	0,97	Poucos flocos
	160 + 10,00 ppm	33	1,04	Poucos flocos

QUADRO A.4 – DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO POLÍMERO KFPA 329 - ANIÔNICO

	Concentração (ppm)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	Flocos
Amostra		121	15,2	
Teste 01- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + KFPA 329 (Coagulante + Floculante)	140 + 0,10 ppm	38	2,65	
	140 + 0,50 ppm	45	3,73	
	140 + 1,00 ppm	61	2,27	
	140 + 2,00 ppm	14	1,30	
	140 + 4,00 ppm	44	2,65	
	140 + 10,00 ppm	50	3,38	
Amostra	0,0 ppm (tratado)	109	8,85	
Teste 02- FeCl_3 + KFPA 329 (Coagulante + Floculante)	160 + 0,10 ppm	73	1,56	
	160 + 0,50 ppm	37	2,02	
	160 + 1,00 ppm	39	1,41	
	160 + 2,00 ppm	33	1,57	
	160 + 4,00 ppm	36	1,47	
	160 + 10,00 ppm	41	1,57	
Amostra		46	5,24	
Teste 03- Tanfloc SG + KFPA 329 (Coagulante + Floculante)	200 + 0,10 ppm	108	2,39	
	200 + 0,50 ppm	82	2,55	
	200 + 1,00 ppm	86	2,97	
	200 + 2,00 ppm	68	2,64	
	200 + 4,00 ppm	75	2,63	
	200 + 10,00 ppm	77	2,41	
Amostra		60	4,78	
Teste 04- KCL 112 + KFPA 329 (Coagulante + Floculante)	300 + 0,10 ppm	35	2,56	
	300 + 0,50 ppm	29	2,23	
	300 + 1,00 ppm	61	1,63	
	300 + 2,00 ppm	27	2,07	
	300 + 4,00 ppm	63	1,48	
	300 + 10,00 ppm	28	1,68	
Amostra		60	4,78	
Teste 05- KCL 193 + KFPA 329 (Coagulante + Floculante)	160 + 0,10 ppm	21	2,58	Sem flocos
	160 + 0,50 ppm	22	1,35	Sem flocos
	160 + 1,00 ppm	35	1,72	Poucos flocos
	160 + 2,00 ppm	37	1,70	Melhores flocos
	160 + 4,00 ppm	36	3,37	Ruim
	160 + 10,00 ppm	58	7,46	Ruim

QUADRO A.5 – DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO POLÍMERO KFPN 174 – NÃO-IÔNICO

	Concentração (ppm)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	Flocos
Amostra		121	15,2	
Teste 01- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + KFPN 174 (Coagulante + Floculante)	140 + 0,10 ppm	60	8,39	
	140 + 0,50 ppm	16	4,10	
	140 + 1,00 ppm	112	12,2	
	140 + 2,00 ppm	71	6,37	Sedimentação média
	140 + 4,00 ppm	60	9,16	Sedimentação ruim
	140 + 10,00 ppm	43	9,46	
Amostra	0,0 ppm (tratado)	109	8,85	
Teste 02- FeCl_3 + KFPN 174 (Coagulante + Floculante)	160 + 0,10 ppm	59	1,52	
	160 + 0,50 ppm	36	2,00	
	160 + 1,00 ppm	75	1,96	
	160 + 2,00 ppm	65	1,37	
	160 + 4,00 ppm	55	1,72	
	160 + 10,00 ppm	49	2,53	
Amostra		94	8,40	
Teste 03- Tanfloc SG + KFPN 174 (Coagulante + Floculante)	200 + 0,10 ppm	96	1,97	
	200 + 0,50 ppm	80	1,89	
	200 + 1,00 ppm	80	1,72	Melhores flocos
	200 + 2,00 ppm	109	2,08	
	200 + 4,00 ppm	126	3,01	
	200 + 10,00 ppm	142	3,80	
Amostra		94	8,40	
Teste 04- KCL 112 + KFPN 174 (Coagulante + Floculante)	300 + 0,10 ppm	42	0,60	Sem flocos
	300 + 0,50 ppm	18	0,70	Pequenos flocos
	300 + 1,00 ppm	56	5,78	Flocos médios
	300 + 2,00 ppm	39	1,06	Flocos mais uniformes
	300 + 4,00 ppm	46	1,92	Flocos Grossos
	300 + 10,00 ppm	21	1,48	Flocos grandes
Amostra		94	8,40	
Teste 05- KCL 193 + KFPN 174 (Coagulante + Floculante)	160 + 0,10 ppm	36	1,82	Sem flocos
	160 + 0,50 ppm	42	1,47	Sem flocos
	160 + 1,00 ppm	38	2,05	Sem flocos
	160 + 2,00 ppm	39	2,07	Melhores flocos médios
	160 + 4,00 ppm	46	2,66	Ruim
	160 + 10,00 ppm	49	2,63	Poucos flocos

